

**PROPIEDADES REOLÓGICAS DE FRUTOS Y MASAS DE PLÁTANOS PROCESADOS POR
COCCIÓN Y SU RELACIÓN CON LA MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN**

CRISTINA INÉS ÁLVAREZ BARRETO
Ingeniera de Alimentos

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA DE ALIMENTOS
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÉNFASIS INGENIERÍA DE ALIMENTOS
2014

**PROPIEDADES REOLÓGICAS DE FRUTOS Y MASAS DE PLÁTANOS PROCESADOS POR
COCCIÓN Y SU RELACIÓN CON LA MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN**

CRISTINA INÉS ÁLVAREZ BARRETO
Ingeniera de Alimentos

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctora en Ingeniería con énfasis en
Ingeniería de Alimentos

Director
ALEJANDRO FERNÁNDEZ QUINTERO, Ph. D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA DE ALIMENTOS
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÉNFASIS INGENIERÍA DE ALIMENTOS
2014

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
RESUMEN	9
SUMMARY	11
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. ESTADO DEL ARTE	16
2.1 ASPECTOS CONCEPTUALES GENERALES	16
2.1.1 Musáceas	16
2.1.2 Almidón	20
2.1.2.1 Amilosa	20
2.1.2.2 Amilopectina	21
2.1.2.3 Gránulos de almidón	22
2.1.2.4 Gelatinización del almidón	25
2.1.3 Ablandamiento por cocción del tejido vegetal	28
2.1.4 Propiedades reológicas	29
2.1.4.1 Métodos de análisis reológicos	30
2.2 ANTECEDENTES	32
2.2.1 Almidón y tratamientos térmicos	32
2.2.2 Cinética de cambio de textura de productos vegetales por tratamiento térmico	34
2.2.3 Estudios en propiedades reológicas de productos vegetales	37
2.2.4 Estudios en musáceas	42
2.2.4.1 Almidón en musáceas	44
2.2.4.2 Propiedades reológicas en musáceas	50
3. MATERIALES Y MÉTODOS	59
3.1 MATERIAS PRIMAS	59
3.2 FASE EXPERIMENTAL I. PROCESOS DE COCCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS	59
3.2.1 Condiciones de experimentación en la cocción	59
3.2.2 Evaluación de la firmeza en los trozos cilíndricos cocidos	61
3.2.3 Análisis para estudiar la modificación del almidón en el proceso de cocción	62
3.2.3.1 Análisis térmico por calorimetría diferencial del barrido (DSC por sus siglas en inglés)	63
3.2.3.2 Análisis de viscosidad durante la formación de pasta en suspensión acuosa	63
3.2.3.3 Análisis óptico mediante microscopía electrónica de barrido	64
3.2.3.4 Determinación de índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH) en harinas obtenidas de plátanos cocidos	65
3.3 FASE EXPERIMENTAL II. PREPARACIÓN DE MASAS Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS VISCOELÁSTICAS	65
3.3.1 Elaboración de las masas y condiciones de experimentación	65
3.3.2 Pruebas de viscoelasticidad de las masas	66
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS	68
4.2 FASE EXPERIMENTAL I. PROCESOS DE COCCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS	68
4.2.1 Evaluación y cinética de firmeza	68
4.2.2 Análisis térmico de las harinas por calorimetría diferencial del barrido	74

4.2.2.1 Cinéticas de gelatinización del almidón presente plátanos Hartón y Guayabo	78
4.2.3 Curvas de viscosidad durante la formación de pasta en solución acuosa	87
4.2.4 Índices de absorción de agua (IAA), de solubilidad de agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH) en harinas obtenidas de plátanos cocidos	97
4.3 FASE EXPERIMENTAL II. PREPARACIÓN DE MASAS Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS VISCOELÁSTICAS	97
4.3.1 Parámetros reológicos en la formación de masas	97
5. CONCLUSIONES	109
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
7. ANEXOS	

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos en la realización de este proyecto académico a:

Escuela Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle por el apoyo económico recibido que permitió mi sostenimiento y la realización de esta tesis.

Profesor Alejandro Fernández Quintero director de la tesis, por su valiosa orientación y cuestionamientos que propiciaron la discusión.

Docentes y personal administrativo de la Escuela Ingeniería de Alimentos, por sus aportes y acompañamiento en este proceso de formación.

A Patricia, Yamileth y Yurani, que me dieron no sólo su apoyo en el trabajo de laboratorio, sino también por brindarme su hermosa amistad.

A Teresa Sánchez y personal del laboratorio de calidad de yuca del CIAT, por su orientación y colaboración en las pruebas de laboratorio requeridas.

A mis amigos, familiares y compañeros de estudio por darme siempre aliento en los momentos de dificultad.

A Pacho, Lina y Diana, por acogerme como una hermana.

Y a Alba, Samuel, Juan, Olmedo y Alexandra, porque Dios en su inmensa bondad hizo que fueran el soporte de esta etapa de mi vida.

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Clasificación de bananos y plátanos de cocción	16
Tabla 2. Composición bromatológica de algunas variedades de plátano verde fresco	18
Tabla 3. Producción mundial de plátano, año 2011	19
Tabla 4. Características de gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas	20
Tabla 5. Propiedades de los componentes del almidón	24
Tabla 6. Métodos para estudios reológicos de gran deformación	30
Tabla 7. Métodos para estudios reológicos de baja deformación	31
Tabla 8. Cambios de la composición de plátanos en la maduración	44
Tabla 9. Valores de las constantes de velocidad aparente [k (min ⁻¹)] y firmeza relativa en equilibrio, en cuatro tratamientos de cocción para las variedades Hartón y Guayabo	73
Tabla 10. Temperaturas y grados de gelatinización del almidón para harinas crudas y cocidas de Hartón	75
Tabla 11. Temperaturas y grados de gelatinización del almidón para harinas crudas y cocidas de Guayabo	76
Tabla 12. Parámetro k de la cinética de gelatinización del almidón en harinas cocidas de plátanos Hartón y Guayabo	80
Tabla 13. Parámetros de las curvas de formación de pasta para harinas crudas y cocidas de Guayabo y Hartón	89
Tabla 14. Tangentes de pérdida ($\tan \delta$) para masas de Guayabo y Hartón con contenidos de humedad del 60 y 70%, evaluadas a 2 Hz	99
Tabla 15. Módulos viscoso, elástico y complejo para masas obtenidas de harinas cocidas de Guayabo y Hartón con un contenido de humedad del 60%, evaluados a 2 Hz.	100
Tabla 16. Módulos viscoso, elástico y complejo para masas obtenidas de harinas cocidas de Guayabo y Hartón con un contenido de humedad del 70%, evaluados a 2 Hz.	101

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Estructura de la molécula de amilosa	21
Figura 2. Estructura de la molécula de amilopectina	21
Figura 3. Representación esquemática de una sección de amilopectina indicando el patrón de ramificación α -1,4 de unidades de cadenas (A, B ₁ – B ₃) enlazadas por α -1,6 en puntos de ramificación	22
Figura 4. Arreglo de dobles hélices en las formas cristalinas A y B del almidón	23
Figura 5. Diagramas de difracción de rayos X tipo A, B y Vh en almidón	23
Figura 6. Representación esquemática de los cambios de los gránulos de almidón durante el procesamiento hidrotérmico	25
Figura 7. Termogramas por DSC de diferentes mezclas de almidón de trigo – agua, relacionados con el fenómeno de gelatinización del almidón	27
Figura 8. Efecto del tiempo de procesamiento a 104,4°C sobre la firmeza de cubos de remolacha amarilla enlatada	35
Figura 9. Perfil de viscosidades de diferentes almidones mediante viscoamilógrafo Brabender	38
Figura 10. Perfiles y valores reológicos obtenidos para muestras de brócoli sometidas a diferentes tratamientos de cocción en agua destilada	41
Figura 11. Cambios en el pico relativo de fuerza de muestras de brócoli durante 1 hora de cocción en agua destilada a diferentes temperaturas	41
Figura 12. Pico de fuerza relativo en muestras de brócoli con precocción (0 – 60 min), en agua (50 – 70°C), seguido de cocción (8 min) en agua en ebullición	42
Figura 13. Variación de los perfiles de viscosidad de doce variedades de musáceas Colombianas	43
Figura 14. Fotografía de gránulos de almidón de plátano verde	45
Figura 15. Patrones de hinchamiento (a) y solubilidad (b) de almidón de banano verde (Valery) comparado con almidones para otros propósitos	46
Figura 16. Micrográficas por barrido electrónico con magnificación cercana a 1100x de gránulos de almidón de banano verde Cavendish	47
Figura 17. Termogramas por DSC de almidones de plátano blanco y amarillo	48
Figura 18. Cambios en la fuerza de ruptura de pulpas crudas de banano (Cavendish) y plátano (Big Ebanga) durante cocción a 100°C	50
Figura 19. Microgramas SEM del tejido del parénquima de la pulpa para banano (Cavendish) y plátano (Big Ebanga) durante la cocción	52
Figura 20. Coeficiente de variación del trabajo de penetración en el análisis de textura durante los estudios de cocción en agua de musáceas colombianas	55
Figura 21. Modificación de la firmeza durante la cocción en agua de musáceas colombianas	56
Figura 22. Firmeza de la pulpa cruda de musáceas colombianas	56
Figura 23. Firmeza de trozos de frutos de musáceas colombianas después de la cocción en agua por 120 minutos	57
Figura 24. Factor de disminución de la firmeza después de la cocción	58
Figura 25. Dimensiones de los trozos de Guayabo y Hartón empleados en los procesos de cocción	60
Figura 26. Pasos experimentales para la cocción en agua de musáceas verdes	60
Figura 27. Pasos experimentales para la cocción en vapor de musáceas verdes	61
Figura 28. Proceso de obtención de harinas	62
Figura 29. Disminución de la firmeza relativa de la variedad Guayabo a través del tiempo para cuatro tratamientos de cocción	69
Figura 30. Disminución de la firmeza relativa de la variedad Hartón a través del tiempo para cuatro tratamientos de cocción	70

	Pag.
Figura 31. Disminución de la firmeza relativa en Guayabo y Hartón a través del tiempo para los tratamientos de cocción en agua a 76°C y a 86°C	71
Figura 32. Disminución de la firmeza relativa en Guayabo y Hartón a través del tiempo para los tratamientos de cocción en agua en ebullición y con vapor	72
Figura 33. Factor de disminución de firmeza	74
Figura 34. Microfotografías SEM de harinas crudas de plátanos Hartón y Guayabo	78
Figura 35. Cinética de gelatinización del almidón para la variedad Hartón en cuatro tratamientos de cocción	79
Figura 36. Cinética de gelatinización del almidón para la variedad Guayabo en cuatro tratamientos de cocción	80
Figura 37. Microfotografías SEM para harinas de Guayabo obtenidas por tratamientos de cocción en agua a 76 y 86°C	82
Figura 38. Microfotografías SEM para harinas de Guayabo obtenidas por tratamientos de cocción en agua en ebullición y con vapor	83
Figura 39. Microfotografías SEM para harinas de Hartón obtenidas por tratamientos de cocción en agua a 76 y 86°C	84
Figura 40. Microfotografías SEM para harinas de Hartón obtenidas por tratamientos de cocción en agua en ebullición y con vapor	85
Figura 41. Curvas de formación de pasta de harinas de Guayabo obtenidas en los diferentes tratamientos de cocción de los frutos a 3, 30 y 60 minutos	87
Figura 42. Curvas de formación de pasta de harinas de Hartón obtenidas en los diferentes tratamientos de cocción de los frutos a 3, 30 y 60 minutos	88
Figura 43. Gráfico de interacción para el índice de absorción de agua con relación a la variedad y el tratamiento de cocción	93
Figura 44. Gráfico de interacción para el índice de absorción de agua de manera consolidada para las variedades Hartón y Guayabo con relación al tratamiento de cocción y el tiempo	93
Figura 45. Gráfico de interacción para el índice de solubilidad en agua con relación a la variedad y el tratamiento de cocción	94
Figura 46. Gráfico de interacción para el índice de solubilidad en agua de manera consolidada para las variedades Hartón y Guayabo con relación al tratamiento de cocción y el tiempo	95
Figura 47. Gráfico de interacción para el poder de hinchamiento con relación a la variedad y el tratamiento de cocción	96
Figura 48. Gráfico de interacción para el poder de hinchamiento de manera consolidada para las variedades Hartón y Guayabo con relación al tratamiento de cocción y el tiempo	97
Figura 49. Comportamiento de los módulos elástico (G') y viscoso (G'') para masas obtenidas de harinas cocidas en vapor durante 45 minutos, provenientes de plátanos Hartón y Guayabo con contenidos de humedad del 60 y 70%	98
Figura 50. Comportamientos de módulo elástico (G'), índice de absorción de agua (IAA), poder de hinchamiento (Pod. H) con respecto al tiempo para masas obtenidas de harinas procesadas por cocción con vapor.	104
Figura 51. Comportamientos de módulo elástico (G'), índice de absorción de agua (IAA), poder de hinchamiento (Pod. H) con respecto al tiempo para masas de Hartón y Guayabo	105
Figura 52. Comportamientos de módulo elástico (G') y firmeza relativa con respecto al tiempo para masas obtenidas de harinas procesadas por cocción con vapor	106
Figura 53. Comportamientos de módulo elástico (G') y firmeza relativa con respecto al tiempo para masas de Guayabo y Hartón	107

RESUMEN

Mediante procesos de investigación como los presentados en esta tesis, se buscó determinar las características texturales de frutos cocidos de dos cultivares colombianos de plátano verde, Hartón y Guayabo, así como la determinación de las propiedades reológicas de masas preparadas a partir de harinas obtenidas de los frutos cocidos y su relación con el grado de gelatinización del almidón también fueron parte de este trabajo.

Experimentalmente se realizaron cuatro tratamientos de cocción, tres de ellos en agua, empleando temperaturas de 76, 86 y 96°C (temperatura de ebullición, para la ciudad de Cali, Colombia), manteniendo constante la relación agua : plátano de 6 a 1, el cuarto tratamiento consistió en utilizar vapor a una presión de 10 psig. Las muestras de plátano sometidas a los tratamientos de cocción consistieron en trozos cilíndricos de 4,5 cm de longitud.

Durante los tratamientos de cocción se midió la firmeza de los trozos cilíndricos. Se tomaron 15 muestras en un rango de tiempo de cocción entre 3 y 60 minutos, información que se utilizó para el estudio de la cinética de pérdida de firmeza. Para investigar el estado de conversión del almidón dentro de los materiales cocinados se escogieron y prepararon muestras de harinas para análisis, los cuales consistieron en determinación del grado de gelatinización del almidón, mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC, por su nomenclatura en inglés), también se hicieron mediciones de índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad (ISA), poder de hinchamiento (PH) y se obtuvieron las curvas de formación de pasta empleando el analizador de viscosidad RVA (por su nomenclatura en inglés). A las muestras también se les observó el estado físico de los almidones mediante microscopía electrónica de barrido.

Se seleccionaron muestras de trozos de plátano cocidos a 3, 15, 30, 45 y 60 minutos en los cuatro tratamientos estudiados, las cuales se convirtieron en harina, se hidrataron y se obtuvieron masas, con contenidos de humedad de 60 y 70%. Estas muestras de masa fueron analizadas mediante reología dinámica para el estudio de viscoelasticidad en un reómetro Bohlin, obteniéndose valores de módulo elástico (G'), módulo viscoso (G'') y tangente de pérdida ($\tan \delta$). Estos resultados se asociaron a los valores obtenidos de firmeza durante la cocción y a algunos de los indicadores de conversión del almidón determinados.

Los resultados sobresalientes de esta investigación se pueden resumir de la siguiente manera: En general en todos los tratamientos de cocción y para los dos cultivares de plátanos evaluados se observó que la pérdida de firmeza fue mayor en los primeros 9 minutos de tratamiento. Se pudo asociar el grado de gelatinización del almidón con la pérdida de firmeza en las muestras tratadas en agua en ebullición y con vapor. En las cocciones en agua a 76°C y 86°C de muestras de Guayabo se observó poca asociación entre la pérdida de firmeza y el grado de gelatinización del almidón, en cambio en la cocción de muestras de Hartón en las mismas condiciones si hubo una mejor relación entre el grado de gelatinización del almidón y la pérdida de firmeza.

En la evaluación reológica de las masas predominó el carácter elástico, es decir, valores de G' mayores que G'' , por lo que el comportamiento de las masas tiende a ser más de carácter sólido que de líquido. El contenido de humedad en las masas estuvo relacionado con sus características viscoelásticas, observándose que los módulos G' y G'' disminuyeron cuando se prepararon al contenido de humedad más alto, esto está relacionado con el efecto plastificante del agua. Se

observó que las masas provenientes los tratamientos de cocción a las mayores temperaturas y tiempos más prolongados presentaron menores valores de los módulos, indicando la presencia de estructuras más débiles en las masas, lo que se asoció con el aumento en el grado de gelatinización del almidón. Varios de los indicadores de conversión del almidón se pudieron relacionar con el comportamiento reológico de las masas. En particular se identificó que el tratamiento de cocción en vapor incidió sobre la reología de las masas en el sentido que predominó el comportamiento elástico, lo que estuvo asociado a mayores pérdidas de firmeza en los trozos de ambos cultivares durante este tratamiento.

En este trabajo se tuvieron en cuenta otras condiciones de cocción para el plátano, como el empleo de temperaturas para el agua de cocción diferentes a la de ebullición y cocción con vapor, ya que en trabajos previos sólo se habían realizado estudios con agua en ebullición, de esta manera pudo establecerse la incidencia de las variaciones en los tratamientos térmicos sobre la gelatinización del almidón para provocar cambios en la firmeza de los materiales cocidos. Adicionalmente se planteó la obtención de masas de plátano procedentes de la hidratación de harinas procedentes de los materiales tratados térmicamente, identificando su comportamiento elástico, por lo que las condiciones reológicas establecidas proveen información científica de interés para el planteamiento de futuros estudios enfocados en desarrollos tecnológicos que impliquen un mayor aprovechamiento industrial de cultivares como el Hartón y el Guayabo.

Palabras claves: Hartón, Guayabo, textura, módulo elástico, almidón, gelatinización.

SUMMARY

Through research processes as the work presented in this thesis, it is wanted to determine the textural characteristics of cooked fruits from two green Colombian plantain cultivars, namely Harton and Guayabo. The determination of the rheological properties of flour prepared doughs obtained from those cooked fruits and their relation with the gelatinization degree of the starch are also part of this work.

Four cooking treatments were carried out experimentally. Three treatments were done in water with temperatures of 76, 86 and 96 °C (boiling temperature for the city of Cali, Colombia), keeping constant water : plantain ratio of 6 : 1. The fourth treatment consisted of using water steam at 10 psig. pressure. In all cases the samples consisted of 4,5 cm long cylindrical pieces.

In the cooked fruits an evaluation of the texture was performed based on the firmness attribute of cylindrical pieces. Fifteen samples were taken at a range of cooking times between 3 and 60 minutes, with this information the firmness loss kinetic was defined. The cooked materials were transformed to flours to which the gelatinization degree was determined by making use of Differential Scanning Calorimetry (DSC). Physical and chemical parameters as Water Absorption Index (WAI), the Solubility Index (SI) and the Swelling Power (SP) were also calculated. Pasting curves were obtained by using both Rapid Visco Analyser (RVA). The samples were also observed the physical condition of starches by scanning electron microscopy.

Doughs were prepared from the flour obtained from the fruits cooked for 3, 15, 30, 45 and 60 minutes in the four studied treatments. The preparation process consisted of hydrating the flours with distilled water up to reaching a final moisture content of 60 and 70%. The viscoelastic doughs properties were evaluated a Bohlin rheometer by performing a dynamic rheological analysis, considering as parameters the oscillatory measurements of elastic module (G'), viscous module (G'') and loss tangent ($\tan \delta$). These results were associated with the obtained values of firmness during cooking and some of the indicators of certain starch conversion.

The outstanding results of this research can be summarized as follows: It was generally seen that in the first 9 minutes the softening was severe. The impact of the starch gelatinization degree on the firmness loss was highly visible in both the boiling water cooking and steam cooking. Particularly for the Guayabo cooking at 76 °C and 86°C the gelatinization phenomenon was not decisive because the relative firmness values were higher, although this cultivar showed gelatinization constant speeds higher than those in the Hartón.

In the evaluation of the viscoelastic properties in all considered treatments, the module that showed the highest values was the elastic module (G') and the $\tan \delta$ was near to 0. For this reason the dough behavior is more of a solid element than a liquid one. Furthermore it was observed that the module values were lower for doughs with higher moisture content, of 70%, and decreased with the temperature rise and the processing time, which had relation with the increase of the starch gelatinization degree, this is related to the plasticizing effect of water. It was observed that the dough from the cooking processes at the higher temperatures and longer times showed lower

modulus values, indicating the presence of weaker doughs structures, which was associated with the increase in the degree of gelatinization starch. Several of the indicators starch conversion might be related to the rheological behavior of the doughs. It was found that the treatment influenced cooking in steam on the rheology of doughs in that predominant elastic behavior, which was associated with greater loss of firmness in the pieces of both plantains during this treatment.

In this research other cooking conditions for the plantain were considered as the use of temperature different to the water boiling temperature for the cooking water and the steam cooking. In previous investigations only water boiling temperature was considered. It was then possible to determine the impact of the variations in the thermal treatments on the starch gelatinization to cause changes in the firmness in the cooked materials. Moreover it was presented the procurement of plantain doughs from the hydration of flour which comes from the material thermally treated. Its elastic behavior was identified. Therefore the determined rheological conditions provide scientific information of interest for the approach of future researches focused on technological developments that involve a higher cultivar industrial exploitation as the Hartón and the Guayabo.

Keywords: Hartón, Guayabo, texture, elastic module, starch, gelatinization.

INTRODUCCIÓN

Los plátanos (*Musa* spp., del grupo AAB) constituyen una de las principales cosechas de occidente y centro de África y son cultivados en unos 120 países en vías de desarrollo. Los frutos que han desarrollado su madurez fisiológica tienen una composición nutricional comparable a las papas y son ampliamente consumidos como productos cocidos (Qi *et al.*, 2000). Se estima que a nivel mundial las musáceas se cultivan en una superficie de 10 millones de hectáreas y que producen alrededor de 84 millones de toneladas de fruta, de los cuales un poco más de 10% es exportable (Vázquez *et al.*, 2005).

En Colombia, el plátano es uno de los productos alimenticios de mayor importancia y es el cultivo permanente con mayor presencia en los sistemas de economía campesina. Es un producto básico en la dieta de los colombianos, con un consumo per cápita estimado de 155 kg/año. Para el año 2008, la producción de plátano en Colombia alcanzó 2,8 millones de toneladas, de las cuales lo exportado correspondió al 3,6%, cerca del 1% se destinó al consumo de la agroindustria y se estimaron pérdidas equivalentes al 10% de la producción. El resto es consumido en los hogares rurales y urbanos del país. Colombia participa con el 8,6% de la producción mundial de plátano, con un comportamiento relativamente estable en los últimos años, alcanzando una producción de 2.815.069 toneladas en 2008, con una tasa de crecimiento anual promedio de 1,1%, entre 1995 y 2008 (Ruiz y Urueña del Valle, 2009).

Los tres grandes sectores que consumen más del 80% de la producción colombiana son, en orden de importancia, los hogares rurales, los hogares urbanos y los restaurantes; menos del 1% es consumido por la industria y las pérdidas por comercialización y transporte se estiman en 12%. El cultivo genera cerca de 286 mil empleos directos permanentes por año, es decir, unas 57 mil familias se dedican a las labores del cultivo en todo el país (Espinal *et al.*, 2005), por lo que el sector transformador requiere mayor atención en la realización de estudios en investigación y desarrollo, no sólo para el aprovechamiento de este material biológico en la generación de nuevos productos, sino también para la consolidación de bases científicas enfocadas al entendimiento e interpretación de las propiedades de los constituyentes de este tipo de materia prima, cuando ésta es sometida a diversas operaciones de transformación como la cocción.

La cocción en agua de productos vegetales, produce cambios en sus características reológicas por la modificación de tejidos que conducen al ablandamiento, tema sobre el cual hay reportes importantes en la literatura científica, indicándose la influencia de factores como variedad, tiempo de cosecha y composición de los materiales, así como método y tiempo de cocción en los atributos texturales que adquieren los materiales cocidos (Binner *et al.*, 2003; Palma *et al.*, 2008; Narpinder *et al.*, 2005; Qi *et al.* 2000).

Para vegetales con alto contenido de almidón, se ha indicado que el ablandamiento por cocción en agua, está acompañado por hidratación, hinchamiento y gelatinización de este componente presente a nivel intracelular, aunque también está influenciado por los materiales de la pared celular e intracelular. Por lo que la textura final probablemente dependa de las propiedades de los componentes de la pared celular, sus composiciones, proporciones e interacciones en relación a los diferentes niveles de estructura, incluyendo mecanismos moleculares por los cuales las células se adhieren unas a otras. Los tratamientos térmicos pueden reducir la fuerza de adhesión intercelular resultando en separación celular y ablandamiento del tejido (Palma *et al.*, 2008).

Las *Musas* comestibles en estado verde de maduración contienen cantidades importantes de almidón, aproximadamente 30,0% en peso fresco en plátanos (Qi *et al.*, 2000). La cocción en agua

y aún en vapor del plátano verde a nivel industrial no está plenamente establecida, lo que conlleva a la falta de productos que requieran dicho tipo de proceso; aunque estos materiales se someten a cocción en agua para la obtención de productos gastronómicos de interés cultural. A pesar del significado del plátano para la dieta humana, hay poca información disponible sobre su comportamiento reológico y el impacto de este proceso sobre las características finales del fruto y más aún en masas obtenidas de sus harinas cocidas.

Es así, como el establecimiento de los cambios que puedan presentar componentes como el almidón del plátano cuando éste es sometido a procesos de cocción u otro tipo de operaciones, para la elaboración de productos como masas y su relación con las propiedades reológicas, requieren de un entendimiento, que fije soportes desde el conocimiento científico de sus potencialidades de uso y aplicación.

1 OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Establecer la incidencia del proceso de cocción sobre la modificación del almidón y las propiedades reológicas de frutos y masas de plátanos.

1.2 ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto del proceso de cocción y la modificación del almidón sobre la firmeza de los frutos de plátanos cocidos.
- Determinar la incidencia del tratamiento de cocción sobre las propiedades viscoelásticas de masas de plátano y la modificación del almidón.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 ASPECTOS CONCEPTUALES GENERALES

2.1.1 Musáceas

Los bananos y plátanos son plantas comprendidas dentro de las monocotiledóneas. Pertenecen a la familia botánica *Musaceae* y ésta al orden *Scitamineae*. La familia *Musaceae* está constituida por los géneros *Musa* y *Ensete*. El género *Ensete* se reproduce por semilla, es de uso ornamental y de hábitat subtropical. El género *Musa* está formado por cuatro secciones: *Australimusa*, *Callimusa*, *Rhodochlamys* y *Eumusa*. La sección *Eumusa* es la de mayor importancia económica y difusión geográfica, ya que en ella se incluyen los bananos y plátanos comestibles. En esta sección, las especies silvestres *Musa acuminata* y *Musa balbisiana* son las más importantes porque por hibridación y poliploidía dieron origen a los plátanos y bananos cultivados. Los cuales se clasifican modernamente en grupos que indican la contribución genotípica y el grado de ploidía con que está constituido cada clon o cultivar. Por conveniencia se denomina con la letra “A” a las características semejantes a *M. acuminata* y con “B” a las *M. balbisiana*. La poliploidía de los genomas se presenta con la repetición de letras. El grupo principal es el triploide de *acuminata* (AAA) que contiene los clones comerciales más difundidos (Vázquez *et al.*, 2005).

Las plantas de banano incluyen los bananos (fruta de postre), plátanos y bananos para cocción (Pacheco-Delahaye *et al.*, 2008). Los bananos de postre para el comercio mundial de alimentos son casi completamente derivados en su composición genética de *Musa acuminata*, indicado como AAA. El plátano comercial (*Musa paradisiaca* AAB) y otros bananos de cocción (*Musa* ABB) son derivados prácticamente de AA·BB por híbridos de *M. acuminata* (AA) y de *M. balbisiana* (BB). Los plátanos y bananos de cocción son muy similares a los bananos fruta (*M. Cavendish* AAA) en su apariencia exterior, aunque a menudo más largos, las principales diferencias en los plátanos es que su pulpa es más amilácea, que dulce, se usan verdes y requieren cocción (Happi Emaga *et al.*, 2007). Los bananos tipo fruta son consumidos básicamente como frutas maduras, mientras que los frutos de los plátanos maduros e inmaduros son usualmente consumidos cocidos o fritos (Pacheco-Delahaye *et al.*, 2008).

Tabla 1. Clasificación de bananos y plátanos de cocción

	Genotipo y nombre	Clasificación genética	Subgrupo
Bananos	<i>Diploide</i> Bocadillo Primitivo	AA AA	Sucrier Sucrier
	<i>Triploide</i> Cavendish Gros Michel Rollizo (Indio) Tafetán morado Guineo	AAA AAA AAA AAA AAA	Cavendish Gros Michel / Red Dacca Mutika – Lujugira
	<i>Tetraploide</i> FHIA 17 FHIA 1	AAAA AAAB	Híbrido Híbrido

	Genotipo y nombre	Clasificación genética	Subgrupo
	FHIA 18	AAAB	Híbrido
	FHIA 25	AAAB	Híbrido
Plátanos de cocción	<i>Triploide</i>		
	África	AAB	Plantain
	Dominico	AAB	Plantain
	Dominco Hartón	AAB	Plantain
	Hartón	AAB	Plantain
	Cubano Blanco (Hartón Blanco)	AAB	Plantain
	Hartón Maqueño	AAB	Plantain
	Guayabo	AAB	Mahia – maoli
	Cachaco	ABB	Bluggoe
	Pelipita	ABB	Pelipita
	<i>Tetraploide</i>		
	FHIA 20	AAAB	Híbrido
	FHIA 21	AAAB	Híbrido

Fuente: Dufour *et al.*, 2008

Los bananos y plátanos son cultivados en cerca de 100 países de las regiones tropicales y subtropicales del mundo donde constituyen el principal producto alimenticio de millones de personas, así como una valiosa fuente de ingresos para el comercio local e internacional. Crecen sobre un área cultivada de 10 millones de hectáreas aproximadamente, con una producción anual que está alrededor de 88 millones de toneladas métricas, de las cuales un tercio es producido respectivamente en regiones Africanas, del Pacífico Asiático y de Latinoamérica y el Caribe. Constituyen uno de los productos alimenticios más económicos de producir. El costo de producción de un kilogramo de plátano (asumiendo que no se requiere control de Sigatoka negra) es inferior que el de la mayoría de otras materias primas importantes, que incluyen papa dulce, arroz, maíz y ñame, por lo que son alimentos muy económicos para comprar y por consiguiente productos alimenticios de importancia para familias de bajos ingresos (Bananas and Food Security, 1998).

Son el cuarto producto cosechado más importante en los países en desarrollo después del arroz, trigo y maíz, en términos del valor bruto de la producción. La mayoría de los productores son cultivadores a pequeña escala, cuya cosecha es para consumo casero o para abastecer el mercado local. También son una fuente de energía económica y fácilmente producida; contribuyen además, a la buena calidad de la dieta e ingresos rurales (Bananas and Food Security, 1998).

Los plátanos y bananos son fuente de micronutrientes tales como carotenos (provitamina A), ácido ascórbico y minerales, particularmente calcio, potasio y fósforo (Tortoe *et al.*, 2008). La pulpa seca de plátano verde consiste del 83% de almidón (Ketiku, 1973, citado por Nwokocha y Williams, 2008), por lo tanto las propiedades reológicas del plátano están enormemente determinadas por la naturaleza de los materiales de almidón (Nwokocha y Williams, 2008). Además, el contenido de materia seca se incrementa durante la maduración, lo cual se ha atribuido a la transpiración durante el almacenamiento (Steele, 1997).

A continuación se presentan algunas características de composición de frutos de *Musa*, de tal manera que pueden identificarse componentes de interés desde el punto de vista bromatológico.

Tabla 2. Composición bromatológica de algunos cultivares de plátano verde fresco

Componente	Cultivares				
	Guineo AAA ^a	Cachaco ABB ^a	Dominico AAB ^a	Hartón AAB ^c	Dominico Hartón AAB ^b
Pulpa (%)	60	60	60	65	77
Humedad (%)	75,2	68,9	59,7	59,4	57,9
Proteínas (%)	1,21	1,0	1,2	1,2	1,3
Grasa (%)	0,1	0,2	0,1	0,2	
Carbohidratos (%)	21,5	27,9	37,4	37,8	37,64
Fibra (%)	0,58	1,1	0,7	0,5	0,11
Cenizas (%)	1,12	0,9	0,9	0,9	0,9
Ca (mg)	3,5	6	5	4	7
P (mg)	82,8	40	31	39	75
Fe (mg)	1,1	0,4	0,5	0,5	1,3
Vitamina A (U.I.)	160	140	1000	1060	
Tiamina B ₁ (mg)	0,04	0,03	0,07	0,06	0,06
Ácido ascórbico (mg)	15	20	20	20	20

Fuentes: ^a Instituto Nacional de Nutrición, 2005.

^b Cayón *et al.*, 2000, ^c Morales, 1994.

Teniendo en cuenta la tabla anterior puede observarse que los plátanos y bananos son frutos ricos en azúcares y suministran una cantidad importante de calorías, características aprovechables a nivel nutricional e industrial, por la posibilidad que ofrecen de su consumo en fresco y constituirse en materias primas para la elaboración de diversos productos alimenticios, que podrían catalogarse en su mayoría en el grupo de alimentos energéticos (Anexo 1, Aplicaciones alimenticias de las musáceas).

El plátano es cultivado en diferentes zonas agroecológicas, desde el nivel del mar hasta los 2000 metros de altura y dentro de un rango de temperatura de 17 a 35°C. De acuerdo con AUGURA (Asociación de bananeros de Colombia), en Colombia se cultivan y cosechan cinco variedades de plátano: Dominico, Dominico Hartón, Hartón, Cachaco o Popocho, y Pelipita, predominando la variedad Hartón (Espinal *et al.*, 2005).

Desde el punto de vista productivo, los sistemas de producción para plátanos y bananos son en su mayoría tradicionales y se dan frecuentemente en asociación con otro tipo de productos agrícolas como el café, coco o ñame (Espinal *et al.*, 2005). En América, la diferencia entre bananos, plátanos y guineos radica en el destino final del fruto y en algunas características morfológicas. Banano es

para consumo fresco, plátano se refiere al fruto que se consume semiprocesado o procesado y guineo se refiere al fruto de tamaño pequeño y anguloso, para consumo humano y animal. Existen variaciones de estas nociones de una región a otra (Cadena Agroindustrial. Nicaragua, 2004).

Con base en la tabla 3, la producción mundial de plátano fue de 33,9 millones de toneladas en 2007, de las cuales el 72%, equivalente a 24,3 millones de toneladas, se concentraron en los países africanos, el 25% en países de Centroamérica, Suramérica y el Caribe, y el 3% en países asiáticos. Aunque los países africanos participan con un amplio volumen dentro de la producción mundial, la mayor parte de éste se destina al consumo interno, razón por la cual tienen una participación marginal en el mercado internacional (Molina y Urueña del Valle, 2009).

Para el año 2011 considerando lo indicado en la tabla 3, Colombia ocupaba el quinto lugar en la producción mundial de plátano, ubicándose los países africanos en los primeros lugares. Los niveles de producción dados en Colombia pueden tenerse como un punto de referencia para un mejor aprovechamiento agroindustrial, pues tradicionalmente el consumo interno de este producto se da en fresco y la participación como país exportador no supera el 15%. Pese a ser productor, Colombia se ha convertido en el segundo importador mundial de plátano. Según las cifras de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), después de Estados Unidos, Colombia es el país de mayores importaciones mundiales de plátano, con cerca de 60000 toneladas promedio anual. A julio del año 2011, ya superaba las 36000 toneladas. Recuperar los mercados externos perdidos y cubrir la demanda interna no satisfecha por la producción nacional de plátano podría significar la generación de aproximadamente 3,6 millones de salarios, en el ciclo de producción de dos años (Portafolio.co, 2011).

Tabla 3. Producción mundial de plátano, año 2011

Posición	Región	Producción (T)
1	Uganda	10547400
2	Ghana	3619830
3	Camerún	3400000
4	Rwanda	3036270
5	Colombia	2957360
6	Nigeria	2700000
7	Perú	1967920
8	Côte d'Ivoire	1559210
9	República Democrática del Congo	1552060
10	Myanmar	950814
11	República Unida de Tanzania	728930
12	Sri Lanka	605440
13	Ecuador	591984
14	Cuba	585000

Posición	Región	Producción (T)
15	República Dominicana	503487
16	Venezuela (República Bolivariana de)	488878
17	Guinea	463000
18	Gabón	452061
19	Malawi	351246
20	Bolivia (Estado Plurinacional de)	336270

Fuente: FAO, FAOSTAT, 2012

2.1.2 Almidón

Es un polímero que se encuentra en los vegetales, realizando una función de reserva y es la principal fuente de carbohidratos de la dieta humana. Además, de ser un ingrediente versátil en los alimentos, es ampliamente usado en la elaboración de ellos y en otras aplicaciones industriales, representando un insumo vital para éstas. Consiste principalmente de una mezcla de dos polisacáridos, la amilosa lineal y la amilopectina excesivamente ramificada. Se localiza dentro de pequeños gránulos cuyo tamaño (diámetros comprendidos entre 1 – 100 μm), forma y apariencia, varían según las plantas y sitio donde esté almacenado (Restrepo, 2002; Casarrubias *et al.*, 2007; Hermansson y Svegmarm, 1996). En la tabla 4 se muestran estas características para almidones de diferentes productos vegetales.

Tabla 4. Características de gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas

Almidón	Tipo	Forma	Distribución del tamaño	Tamaño (μm)
Cebada	Cereal	Lenticular (Tipo A), esférico (Tipo B)	Bimodal	15 – 25, 2 - 5
Maíz (Céreo y normal)	Cereal	Esférico/poliédrico	Unimodal	2 – 30
Avena	Cereal	Poliédrico	Unimodal	2 – 10 (simple ^a) 80 (compuesto ^b)
Arveja	Legumbre	Rentiforme (simple)	Unimodal	4 – 12
Papa	Tubérculo	Lenticular	Unimodal	5 – 100
Arroz	Cereal	Poliédrico	Unimodal	3 – 8 (simple ^a) 150 (compuesto ^b)
Yuca	Raíz	Esférica/lenticular	Unimodal	5 – 45
Trigo	Cereal	Lenticular (Tipo A)	Bimodal Esférica (Tipo B)	15 – 35 2 - 10

^a gránulo individual, ^b gránulos agrupados

Fuente: Tester *et al.*, 2004

2.1.2.1 Amilosa

Es considerada como un polímero esencialmente lineal, compuesta casi por completo por uniones α -1,4 de D-glucopiranososa (figura 1), aunque se ha sugerido que la amilosa presenta algunas ramificaciones (Thomas y Atwill, 1999). En la mayoría de los casos el polímero de amilosa está presente entre el 17 al 30 %, salvo en el maíz en el que está con el 75 % y algunos almidones

waxy o céreos contienen muy pequeñas cantidades < 1%. En el gránulo de almidón, la amilosa se encuentra en forma cristalizada uniéndose unas moléculas a otras mediante puentes de hidrógeno. En disolución las moléculas de amilosa se presentan en forma de hélice, en las que cada vuelta está formada por seis unidades de glucosa y son capaces de incluir a otras moléculas como ácidos grasos, yodo e hidrocarburos, formando los denominados compuestos de inclusión o clatratos (Restrepo, 2002; Parker y Ring, 2001).

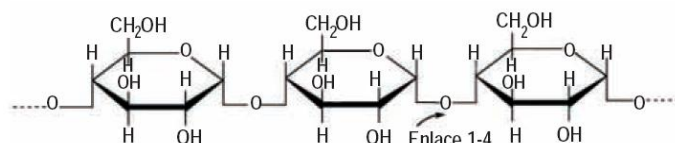


Figura 1. Estructura de la molécula de amilosa
Fuente: Aristizábal y Sánchez, 2007

Las regiones lineales de la cadena de amilosa forman un complejo azul oscuro con iones de poliioduro en solución acuosa. Esta interacción es una base para definir la amilosa como el polisacárido del almidón que es generalmente característico de especies particulares, las cuales bajo condiciones estándar, ligan el 20% de su peso al yodo, mientras que bajo las mismas condiciones la amilopectina generalmente liga menos del 1% p/p. Esta unión con el yodo permite hacer una distinción entre amilosa y amilopectina y permite la determinación del contenido de amilosa aparente en el almidón nativo. Los pesos moleculares típicos de amilosa extraída están en la región de 10^5 a 10^6 g/mol. En solución acuosa la amilosa se comporta como un rollo flexible algo rígido con un radio hidrodinámico típico de 7 a 22 nm. (Parker y Ring, 2001).

En calentamiento con agua, los cristales en los gránulos funden y la amilosa se solubiliza. El estado de la amilosa en el agua varía de acuerdo con la temperatura. Es estable en solución a temperaturas mayores de 60 – 70°C, pero se agrega por asociación o cristalización en congelación y forma geles o precipitados casi instantáneamente. Una vez que el gel o precipitado se ha formado, se requieren temperaturas superiores a 120°C para disolver la amilosa (Hermansson y Svegmarm, 1996).

2.1.2.2 Amilopectina

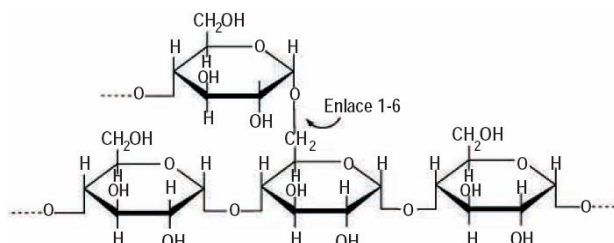


Figura 2. Estructura de la molécula de amilopectina
Fuente: Aristizábal y Sánchez, 2007

Es el polímero predominante en la mayoría de los almidones normales. La molécula de amilopectina es ramificada, con segmentos de glucosa unidos mediante enlaces α -1,4, conectados por puntos de ramificación con enlaces α -1,6. Las ramificaciones son relativamente cortas y contiene de 20 a 30 unidades de glucosa. Con el yodo las unidades de amilopectina dan un color café-rojizo. Durante la cocción, es responsable de la mayor parte del agua absorbida y por ello la principal encargada del hinchamiento de los gránulos de almidón. Debido a su estructura

La amilopectina es uno de los biopolímeros conocidos más largos, con pesos moleculares que están en la región de 10^8 g/mol y un radio hidrodinámico de 21 a 75 nm. Una consecuencia de la ramificación, es que para su peso molecular la molécula de amilopectina es relativamente compacta, adicionalmente, las moléculas de amilopectina interpenetran la ramificación y se agrupan con cadenas de difícil separación (Parker y Ring, 2001). La ramificación dentro de la amilopectina no es aleatoria, su estructura fina depende del origen botánico, la longitud y abundancia de cadenas cortas y largas, así como de la forma y distribución de los constituyentes de las cadenas (Parker y Ring, 2001).

The diagram illustrates a three-stage photonic crystal fiber (PCF) structure. It consists of three identical stages, each with a length of 9 nm. Each stage is composed of a core region (labeled A) and a cladding region (labeled B). The core has a width of 9 nm, and the cladding has a width of 9 nm. The stages are connected in series, with the total length of the structure being 27 nm. The diagram shows the cross-section of the fiber with the core and cladding regions labeled A and B. The stages are labeled 1, 2, and 3. The total length is labeled 27 nm.

Fuente: Tester *et al.*, 2004

2.1.2.3 Gránulos de almidón

22

amilosa, con estructura abierta y más hidratable, consistiendo de dobles enlaces empaquetados en un arreglo hexagonal, como se muestra en la figura 4 (Parker y Ring, 2001).

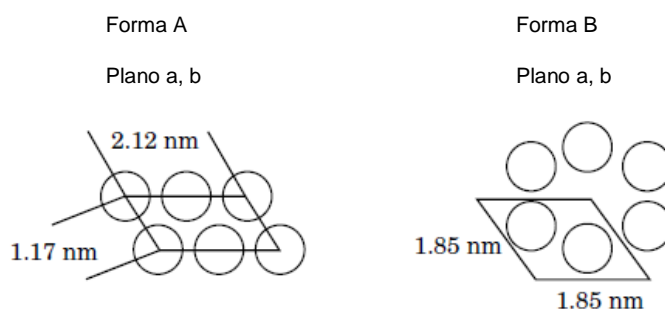


Figura 4. Arreglo de dobles hélices en las formas cristalinas A y B del almidón.
Fuente: Parker y Ring, 2001

La estructura cristalina de los gránulos de almidón puede ser observada por microscopía con luz polarizada u ordinaria y por difracción de rayos X (Restrepo, 2002). Con respecto a la difracción de rayos X, los gránulos nativos exhiben dos tipos principales de diagrama (figura 5) el tipo A para almidones de cereales y el tipo B para tubérculos y almidones ricos en amilosa. Otro tipo de diagrama de difracción es el C, el cual se muestra como una mezcla de diagramas A y B, es característico de la mayoría de almidones de legumbres y también de cereales que crecen en condiciones específicas de temperatura e hidratación. Existe otra forma cristalina, la forma V, propia de complejos de amilosa con ácidos grasos y monoacilglicéridos, la cual aparece en la gelatinización del almidón y rara vez es detectada en almidones nativos, aunque se ha demostrado usando Resonancia Magnética Nuclear en estado sólido, que complejos de amilosa amorfa – lípido están presentes en almidones nativos de maíz, arroz y avena (Buleón *et al.*, 1998).

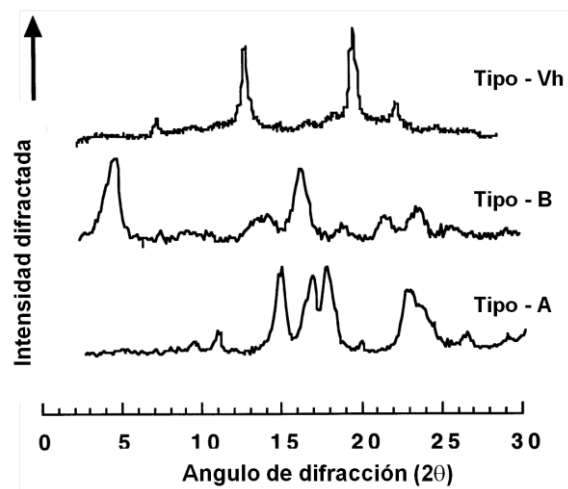


Figura 5. Diagramas de difracción de rayos X tipo A, B y Vh en almidón.

Como se ha mencionado, los gránulos de almidón son principalmente una mezcla de amilosa y amilopectina, por lo tanto, las variaciones en la proporción de estos polisacáridos y sus propiedades e interacciones con otros componentes, pueden explicar las diferencias en el comportamiento del hinchamiento de los gránulos y la funcionalidad de los almidones de diferentes orígenes (Hermansson y Svegmarm, 1996). En la tabla 5, se establece un comparativo de las

propiedades de la amilosa y la amilopectina tanto en sus aspectos fisicoquímicos como funcionales.

Tabla 5. Propiedades de los componentes del almidón

Propiedad	Amilosa	Amilopectina
Estructura	Lineal	Ramificada
Longitud promedio de la cadena	Aproximadamente 1000	20 – 25
Peso molecular	40000 hasta 10^6	200000 hasta 10^6
Grado de polimerización	Aproximadamente 1000	10000 – 100000
En solución	Hélice extendida o enrollada	Esfera irregular
Estabilidad en soluciones acuosas	Retrograda	Estable
Acomplejamiento	Con facilidad	Con dificultad
Retrogradación	Rápida	Muy lenta
Gel	Firme e irreversible	Suave y reversible
Formación de complejos	Favorable	Desfavorable
Patrón de rayos X	Cristalino	Amorfo
Digestibilidad de la β -amilasa	Casi completa	Cerca del 60%
Reacción con yodo	19 – 20%	5 – 9%
Color con la solución de yodo	Azul profundo	Violeta
Longitud de onda máxima (nm)	Aproximadamente 660	530 - 550

Fuente: Aristizábal y Sánchez, 2007

Las propiedades fisicoquímicas como tamaño del gránulo, proporción de amilosa/amilopectina, grado de ramificación de la amilopectina y características funcionales para fines alimentarios y otras aplicaciones industriales como gelatinización, retrogradación, solubilidad, poder de absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico en pastas y geles, varían con el origen biológico, forma y estructura molecular del almidón, lo que tiene una importancia fundamental en la funcionalidad de este polímero y de sus derivados en aplicaciones alimentarias (Casarrubias *et al.*, 2007; Rondán-Sanabria y Finardi-Filho, 2009).

Considerando las propiedades funcionales de los almidones, durante la cocción en agua, los gránulos de almidón sufren una serie de modificaciones que van a influir sobre su estructura, pasando por tres fases importantes: gelatinización, gelificación y retrogradación, los cuales causan hinchamiento, hidratación, fusión y ruptura de los gránulos, como se muestra en la figura 6:

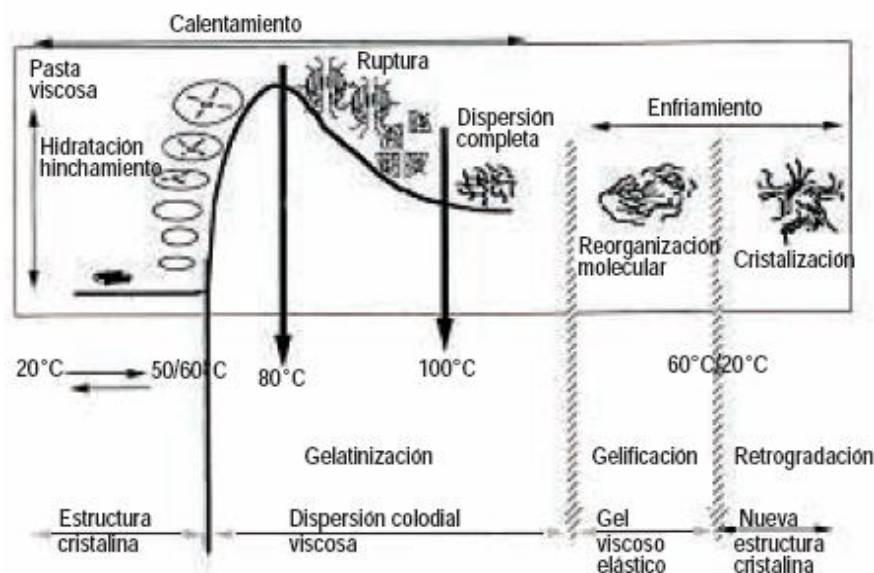


Figura 6. Representación esquemática de los cambios de los gránulos de almidón durante el procesamiento hidrotérmico

Fuente: Aristizábal y Sánchez, 2007

Por lo tanto, las características moleculares y estructurales de los componentes del almidón son de gran importancia para poder sugerir sus posibles aplicaciones en los diversos sistemas alimenticios. Se ha demostrado que el peso molecular promedio de la amilosa y de la amilopectina está directamente relacionado con las propiedades funcionales del almidón. La presencia de amilosa se ha atribuido a la formación de geles, presentando una fuerte tendencia a formar complejos con lípidos y otros componentes, mientras que la amilopectina, tiene efectos estabilizantes (Rodríguez A *et al.*, 2007; Hermansson y Svegmarm, 1996).

2.1.2.4 Gelatinización del almidón

El almidón usualmente es procesado por calentamiento en presencia de agua, lo cual rompe la estructura cristalina, un fenómeno conocido como gelatinización. En un exceso de agua (>90% p/p) por encima de una temperatura crítica conocida como temperatura de gelatinización, el gránulo de almidón pierde su estructura cristalina ordenada y se hincha irreversiblemente muchas veces su tamaño original (Parker y Ring, 2001). Como evidencia de la pérdida de orden de las moléculas de los gránulos están: el hinchamiento irreversible del gránulo, la pérdida de la birrefringencia y la pérdida de la cristalinidad. Durante la gelatinización se produce la lixiviación total de la amilosa, pero también puede producirse antes de ésta (Fennema, 2000), aunque no se observa posterior solubilización de amilopectina de alto peso molecular, hay reporte para algunos almidones, de la solubilización de amilopectina de bajo peso molecular (Parker y Ring, 2001).

Pese a que la temperatura de gelatinización es relativamente fácil de determinar experimentalmente, hay que tener en cuenta que el proceso de gelatinización ocurre sobre un estrecho rango de temperatura para un simple gránulo y un rango algo más amplio para el conjunto de gránulos (Parker y Ring, 2001), siendo los gránulos más grandes los que primero gelatinizan (Fennema, 2000).

La temperatura inicial aparente de gelatinización y el intervalo dentro del cual tiene lugar dependen del método de medida y de la relación almidón-agua, del tipo de gránulo, así como de las heterogeneidades en la población de gránulos. Los diversos estados de gelatinización pueden ser determinados utilizando un microscopio de polarización equipado con un sistema de calentamiento. Estos estados son: la temperatura de iniciación (primera observación de la pérdida de birrefringencia), la temperatura media, la temperatura final de la pérdida de birrefringencia (es la temperatura a la cual el último gránulo en el campo de observación pierde su birrefringencia), y el intervalo de temperatura de gelatinización (Fennema, 2000).

El hinchamiento de los gránulos y la disrupción da lugar a una masa viscosa (la pasta) que consiste en una fase continua de amilosa y/o amilopectina solubilizadas y una fase discontinua de restos de los gránulos (membranas y fragmentos). La dispersión molecular completa no es alcanzada, con excepción quizá de existir condiciones de alta temperatura, elevada fuerza de cizalla y exceso de agua, condiciones que no se presentan con frecuencia en la preparación de productos alimenticios (Fennema, 2000).

Debido a que la gelatinización del almidón es un proceso endotérmico, es muy utilizada la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC, por su nomenclatura en inglés), que mide tanto la temperatura como la entalpía de gelatinización (figura 7). Si bien no existe un acuerdo completo en torno a la interpretación de los datos del análisis de DSC, ni los acontecimientos que tienen lugar a lo largo del proceso de gelatinización, es aceptada la descripción que indica que el agua actúa como plastificante, su efecto favorecedor de la movilidad es llevado a cabo en primer lugar en las regiones amorfas, que físicamente tienen la naturaleza de un vidrio. Cuando los gránulos de almidón se calientan en presencia de suficiente agua (al menos el 60%) y se alcanza una temperatura específica (T_g , temperatura de transición vítrea), las regiones amorfas plastificadas del gránulo sufren una transición de fase de un estado vítreo a un estado gomoso. Sin embargo, el pico de absorción de energía asociado con esta transición a menudo no es detectado por DSC a causa de que las regiones de cristalinidad, es decir, las ramas en doble hélice de amilopectina ordenadas y empaquetadas son contiguas y están conectadas por enlaces covalentes a las regiones amorfas, y así la fusión de los cristales sigue inmediatamente a la transición vítrea. Puesto que la entalpía de fusión inicial (T_m) es mucho mayor que la de la transición vítrea, esta última normalmente no se hace evidente. La fusión de los complejos lípido-amilosa sólo se produce a una temperatura mucho más elevada (100 – 120°C con agua en exceso) que la de las ramas en doble hélice de amilopectina empaquetadas en orden cristalino. Estos complejos se forman con segmentos en hélice sencilla de las moléculas de amilosa cuando se enfría una pasta de almidón que contiene lípidos monoacíclicos. El pico de DSC correspondiente a este acontecimiento está ausente en los almidones céreos (sin amilosa) (Fennema, 2000).

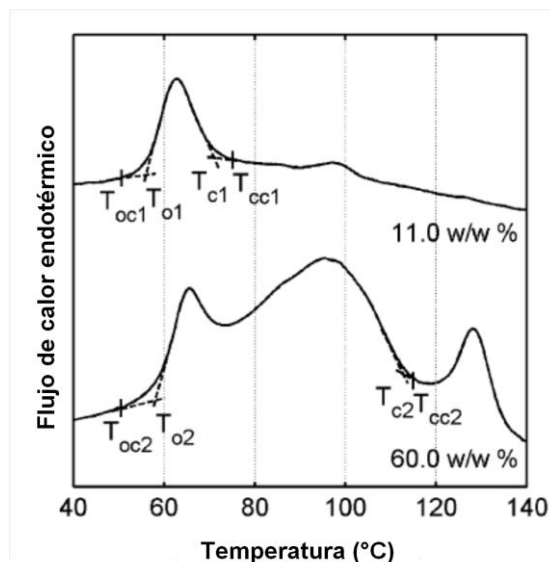


Figura 7. Termogramas por DSC de diferentes mezclas de almidón de trigo – agua, relacionados con el fenómeno de gelatinización del almidón

Fuente: Baks *et al.*, 2007

En las condiciones normales de procesamiento de los alimentos, los gránulos de almidón se hinchan rápidamente más allá del punto de reversibilidad. Las moléculas de agua penetran entre las cadenas, rompen los enlaces entre las mismas y establecen capas de hidratación alrededor de las moléculas así separadas. Esto plastifica las cadenas, de manera que se separan totalmente y se solvatan. La entrada de grandes cantidades de agua da lugar a que los gránulos se hinchen hasta alcanzar un tamaño varias veces superior al original. Si una suspensión de almidón al 5% se agita moderadamente y se calienta, los gránulos embeben agua hasta que la mayor parte es absorbida por ellos, forzándolos a hincharse, y a presionar unos contra otros hasta llenar el recipiente que los contiene en forma de una pasta altamente viscosa. Los gránulos así hinchados se rompen fácilmente, y son desintegrados por agitación, lo que resulta en una disminución de la viscosidad. Conforme se van hinchando, las moléculas de amilosa hidratadas difunden a través de la pasta hasta la fase externa (agua), fenómeno que es responsable de algunos aspectos del comportamiento de la pasta. El hinchamiento del almidón puede ser medido utilizando un viscoamilógrafo, que registra la viscosidad de manera continua al incrementar la temperatura, mantenerla después constante y disminuirla por último. Cuando se alcanza el pico de máxima viscosidad, algunos gránulos ya han sido rotos por la agitación. Si se continúa agitando, más gránulos se rompen y fragmentan, causando entonces una disminución de la viscosidad. Al enfriar algunas moléculas de almidón se retrogradan (Fennema, 2000).

Como el gránulo del almidón es una estructura compleja, no es de sorprenderse que la descripción de los procesos durante la gelatinización sean igualmente complejos. Por necesidad práctica, se deberían llevar a cabo experimentos durante este proceso, realizados sobre materiales amiláceos tenidos a temperatura ambiente, siguiendo un reordenamiento potencial de la estructura. Se han efectuado estudios utilizando técnicas como NMR en estado sólido, difracción de rayos X y DSC (Calorimetría Diferencial de Barrido), aunque con estos procedimientos se prueban diferentes aspectos de la pérdida del orden en el gránulo, se ha encontrado que la pérdida del orden como una función de la temperatura es ampliamente similar. Hay un gran consenso que, para una población de gránulos, todas las formas de orden son al menos modificadas en un rango de temperatura semejante. Para evaluar la pérdida de orden como una función de la temperatura es

necesario considerar la heterogeneidad en la estructura sobre la población estudiada (Parker y Ring, 2001).

2.1.3 Ablandamiento por cocción del tejido vegetal

Las frutas y vegetales se pueden consumir crudos. Otros son preparados para su consumo por métodos como el horneado, la cocción en agua, la cocción por presión, fritura y cocción por vapor. Cuando los períodos de cocción son cortos y se selecciona un método como la cocción con vapor, el efecto es mínimo sobre la pérdida en el sabor y valor nutricional, además con el vapor se retiene el color natural y no permite el contacto entre los ácidos internos liberados y el alimento. La cocción introduce cambios aparentes en la textura, así como en el sabor y el valor nutricional (Vaclavik y Christian, 2008).

Los productos vegetales se ablandan cuando se calientan, en parte debido a la pérdida de turgencia (particularmente vegetales de hojas), pero también debido a cambios químicos complejos de los polisacáridos en la matriz de la pared celular y en los componentes de la lamela media. La pared celular está hecha de fibras de celulosa embebidas en una matriz consistente de grandes sustancias pécticas, hemicelulosa, proteínas, ligninas, solutos de bajo peso molecular y agua. Los porcentajes de las sustancias pécticas, hemicelulosa y celulosa en la pared principal prácticamente son iguales. Como una simple explicación se puede decir que la celulosa da rigidez y resistencia al rompimiento, mientras que las sustancias pécticas y la hemicelulosa confieren plasticidad y capacidad de alargamiento. La lamela media se puede considerar que es una extensión del material de la matriz de la pared celular, pero sin materiales celulósicos (Rao y Lund, 1986).

Los cambios en la textura por el ablandamiento en los tejidos, están influenciados por factores como el pH, tipos y cantidades de sales que están presentes y la variación en el tratamiento de cocción, en este último caso, se afecta además el valor nutricional de los productos vegetales. Adicionalmente, la ganancia de agua por los polisacáridos puede reducir la cohesividad de la matriz de la pared celular y disminuir la adhesión intercelular. Un alto grado de metoxilación de la pectina de la pared celular puede incrementar la ganancia de agua. La demetoxilación de las sustancias pécticas catalizadas por la enzima pectinmetilesterasa es importante para la textura de frutos y vegetales. Las enzimas están activas cuando el tejido de la planta es magullado o es congelado o calentado de 50 a 80°C. La demetoxilación usualmente resulta en una textura firme de los frutos previo al procesamiento térmico y de los vegetales después de este tipo de procesos. Los niveles indeseables de ablandamiento se pueden reducir durante el tratamiento con calor mediante la adición de sales de calcio antes del procesamiento en una cantidad no superior al 1% en peso de la fruta o vegetal, evitando sabores residuales (Rao y Lund, 1986; Chun-Hsien y Chi-Yue, 2005).

En el procesamiento de alimentos amiláceos, el tratamiento de cocción causa hinchamiento del almidón dentro de las células lo que crea una presión interna que conduce a cada célula hacia una forma esférica y las separa de sus vecinas hacia los extremos. El predominio de la separación de la célula resulta en una textura descrita como harinosa. Como el propósito esencial del tratamiento hidrotérmico es la gelatinización del almidón, en el caso de alimentos amiláceos con baja humedad como los cereales integrales, se realiza un preacondicionamiento del grano en agua a temperatura ambiente para incrementar el contenido de humedad para la gelatinización del almidón en la cocción. En el caso de productos amiláceos con alta humedad como la papa, su contenido natural de agua es lo bastante alto y suficiente para la gelatinización del almidón, por lo que el paso de preacondicionamiento es omitido y se aplica directamente la cocción (Binner *et al.*, 2003; Turhan y Sağol, 2004).

2.1.4 Propiedades reológicas

La reología es la ciencia que estudia la deformación de los materiales incluyendo los que fluyen. Los datos reológicos son requeridos en la evaluación de calidad de los productos, cálculos de ingeniería y diseño de procesos (Sahin y Sumnu, 2007). Igualmente la reología estudia la manera en la cual los materiales responden a un esfuerzo o deformación aplicados (Steffe, 1992).

Con respecto a la textura, ésta puede ser definida como el grupo de características físicas que provienen de los elementos estructurales de los alimentos, evaluados sensorialmente a través del tacto, relacionados con la deformación, desintegración y flujo del alimento bajo una fuerza y medido objetivamente por funciones de masa, tiempo y distancia (Rizvi y Tong, 1997). La textura también hace referencia a la mezcla de los elementos relativos a la estructura del alimento y a la manera por la cual están relacionados con los sentidos fisiológicos, aunque no tiene una definición exacta, precisa y satisfactoria, se puede decir que posee ciertas características:

- Se trata de un grupo de propiedades físicas que derivan de la estructura del alimento.
- Están relacionadas con la mecánica y la reología.
- No se trata de una propiedad sino de un conjunto de propiedades.
- No está directamente relacionada con el olor o el gusto (Roudot, 2004).

Para el entendimiento de la reología y textura de alimentos es importante considerar el *esfuerzo* (stress) y la *deformación* (strain). El esfuerzo está definido como fuerza por unidad de área, generalmente se expresa en Pascal ($\text{Pa} \sim \text{N/m}^2$), éste puede categorizarse en dos grupos: *Esfuerzo normal* (normal stress) y *esfuerzo de cizalla* (shear stress). Las diferencias entre estos dos esfuerzos dependen del área sobre la cual actúa la fuerza. El esfuerzo normal (σ) se define como la fuerza aplicada perpendicularmente al plano por unidad de área, el cual puede ser de tensión o compresión dependiendo si éste tiende a estirar o comprimir el material sobre el que actúa. En el esfuerzo de cizalla (τ), el esfuerzo actúa tangencialmente a la superficie y es definido como la fuerza aplicada al plano por unidad de área (Sahin y Sumnu, 2007).

Con respecto a la deformación, es la unidad de cambio en tamaño o en forma de un material referido a su condición original (en tamaño o forma) cuando se aplica una fuerza. Así como el esfuerzo, la deformación también puede dividirse en dos grupos, *deformación normal* (normal strain) y *deformación de cizalla* (shear strain). La deformación normal (ϵ) es el cambio en la longitud por unidad de longitud en la dirección en la que se aplica el esfuerzo normal. La deformación de cizalla (γ) se define como el cambio en el ángulo formado entre dos planos que están previos a la deformación como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo (Sahin y Sumnu, 2007).

Hay que tener en cuenta, que cuando se habla de comportamiento viscoelástico, significa que el material simultáneamente exhibe algunas de las propiedades elásticas de un sólido ideal y algunas de las propiedades de flujo de un líquido ideal. El comportamiento viscoelástico podría dividirse en dos grupos generales:

- Viscoelasticidad lineal, en la cual las propiedades reológicas dependen únicamente del tiempo y no de la magnitud o tasa de aplicación de un esfuerzo. La mayoría de los alimentos muestran viscoelasticidad lineal por encima de ligeras deformaciones de un pequeño porcentaje.
- Viscoelasticidad no lineal, donde las propiedades mecánicas están en función del tiempo del esfuerzo aplicado, la magnitud del esfuerzo y en ocasiones la velocidad a la cual se aplica el esfuerzo. El estudio de la viscoelasticidad no lineal es experimental y teóricamente más complicado que la viscoelasticidad lineal, estando aún en el rango en el cual muchos alimentos son comprimidos o cizallados en la boca (Bourne, 2002).

Los componentes viscosos y elásticos de fluidos viscoelásticos pueden medirse mediante pruebas oscilatorias de pequeña amplitud. El material de prueba usualmente se ubica entre un cono y plato o platos paralelos puestos en un reómetro con esfuerzo controlado y el cono o el plato oscila con respecto a un punto central con una velocidad angular sinusoidal a una baja amplitud mientras que el esfuerzo de cizalla es medido. Es una prueba no destructiva cuando la amplitud es pequeña. Para un sólido elástico el esfuerzo de cizalla estará en fase con la deformación pero para un fluido newtoniano el esfuerzo de cizalla está 90° fuera de fase con la deformación. Para un fluido viscoelástico el esfuerzo de cizalla está una onda más atrás de la deformación para un ángulo de diferencia entre 0° y 90°. La curva experimental esfuerzo de cizalla – tiempo puede dividirse en dos componentes (Bourne, 2002):

- 1) El componente del esfuerzo en fase con la deformación por cizalla está definida como el módulo de almacenamiento (o elástico) G' . Es la relación del esfuerzo en fase con la deformación.

$$G' = \sigma' / \gamma \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, σ' es el esfuerzo de cizalla en fase y γ es la deformación.

- 2) El componente del esfuerzo 90° fuera de fase con la deformación de cizalla es definida como el módulo de pérdida (o viscoso) G'' . Es la relación del esfuerzo de cizalla fuera de fase con la deformación.

$$G'' = \sigma'' / \gamma \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde, σ'' es el esfuerzo de cizalla 90° fuera de fase.

Estas funciones a su vez se relacionan:

$$\frac{G''}{G'} = \text{Factor o tangente de pérdida (tan } \delta) \quad \text{Ecuación 3}$$

2.1.4.1 Métodos de análisis reológicos

Puede considerarse la medición de la textura de los alimentos como el estudio de la debilidad de los materiales más que la resistencia de los mismos. Estas evaluaciones generalmente asumen: (1) pequeñas deformaciones (1 – 3% máximo); (2) material continuo, isotrópico (exhibe las mismas propiedades físicas en cualquier dirección) y homogéneo; y (3) la pieza a evaluar es de forma uniforme y regular. Estas pruebas generalmente son de lenta ejecución, no hacen correlación con evaluación sensorial como lo hacen con evaluaciones empíricas; además, emplean equipos costosos (Bourne, 2002). Entre los métodos reológicos de evaluación se encuentran:

Tabla 6. Métodos para estudios reológicos de gran deformación

Compresión uniaxial	Análisis del perfil de textura (TPA)	Medición de las propiedades de formación de pasta
<ul style="list-style-type: none"> • Usualmente requiere geles firmes. • Requiere gran número de muestras para réplica de dimensiones uniformes, para una reproducibilidad aceptable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere gran número de muestras para réplica de dimensiones uniformes, para una reproducibilidad aceptable. • Compresión uniaxial de muestra con dimensiones 	<ul style="list-style-type: none"> • Observación de cambios de viscosidad durante un calentamiento y enfriamiento programado de suspensiones de almidón. • Con influencia de factores como velocidad rotacional y

Compresión uniaxial	Análisis del perfil de textura (TPA)	Medición de las propiedades de formación de pasta
	<p>definidas, removiendo la fuerza de compresión y la muestra es recomprimada.</p> <ul style="list-style-type: none"> La secuencia de compresión representa dos mordidas. 	<p>geometría del dispositivo de medición.</p> <ul style="list-style-type: none"> Requiere tiempos prolongados para la formación de la pasta y su medición. Usualmente son necesarias grandes cantidades de muestra.

Hay un número de pruebas que pueden usarse para estudiar las propiedades viscoelásticas de las dispersiones de almidón gelatinizado para determinar la relación entre el esfuerzo, la deformación y el tiempo para un tipo de deformación dada bajo un patrón de carga. Las evaluaciones más importantes incluyen pruebas oscilatorias dinámicas, prueba de creep o recuperación y prueba de estrés de relajación, las dos últimas evaluaciones se conocen como experimentos estáticos (Abd et al., 2000).

Tabla 7. Métodos para estudios reológicos de baja deformación

Reometría dinámica oscilatoria	Creep o recuperación (Capacitancia de fluencia)	Estrés de relajación
<ul style="list-style-type: none"> Implica unidades físicas absolutas para permitir comparación entre instrumentos diferentes (Pa s^{-1} o Pa). Pueden utilizarse varias deformaciones o fuerzas de deformación. La muestra está sujeta a un esfuerzo de torque sinusoidal de pequeña amplitud y el esfuerzo aplicado será alterado por una frecuencia dada (ciclos s^{-1} o $\omega \text{ rad s}^{-1}$). Si el comportamiento del material viscoelástico es lineal, la deformación variará sinusoidalmente con el esfuerzo, pero fuera de fase con éste. 	<ul style="list-style-type: none"> Investiga el comportamiento viscoelástico para largos períodos de tiempo. Se aplica un esfuerzo constante y el desplazamiento resultante o deformación es medido contra el tiempo. Si se requiere se remueve el esfuerzo y se mide la relajación de la muestra. Los resultados generalmente se expresan en términos de la capacitancia de fluencia J $J(t) = \frac{\text{Deformación (t)}}{\text{Esfuerzo}}$ <ul style="list-style-type: none"> En un sólido viscoelástico hay equilibrio dinámico entre el rompimiento y la recuperación de los enlaces. En los líquidos viscoelásticos hay un rompimiento neto de los enlaces resultando en un fluido viscoso. En una prueba fluencia/recuperación se pueden considerar tres mecanismos: elasticidad instantánea, elasticidad retardada y flujo viscoso. 	<ul style="list-style-type: none"> Aplicación de esfuerzo constante a la muestra y medición de la deformación como función del tiempo. Al relajarse las muestras el esfuerzo decrece. Los experimentos para su aplicación resultan ser un poco más fáciles que los de fluencia.

Con respecto a la viscoelasticidad de masas, la formación de una red gelatinosa durante el amasado confiere a las masas de harina un comportamiento reológico viscoelástico. Esta viscoelasticidad tiene un interés tecnológico de primer orden, si se considera la aptitud de la masa

para su transformación durante el proceso de fabricación y características texturales de los productos acabados que se obtienen. Las propiedades reológicas se determinan midiendo las deformaciones que sufren las masas bajo el efecto de esfuerzos controlados (y viceversa). Los métodos de referencia se basan en medidas oscilatorias. También se utilizan medidas basadas en el análisis de fenómenos transitorios durante la aplicación (o retirada) de esfuerzos. Sin embargo, los métodos empíricos tradicionales todavía están ampliamente en vigor, aunque a menudo su interpretación sea difícil (Roudot, 2004).

2.2 ANTECEDENTES

2.2.1 Almidones y tratamientos térmicos

Beleia *et al.*, 2006, realizaron estudios experimentales para determinar el grado de gelatinización del almidón durante procesos de cocción, efectuado en parénquima de yuca, el cual consistió en un método colorimétrico con yodo, basado en la amilosa liberada durante la gelatinización, empleando un modelo cinético de primer orden:

$$\ln (1 - \alpha) = -kt \text{ Ecuación 4}$$

Donde α corresponde a la fracción de almidón gelatinizado y k es la constante de velocidad (min^{-1}). La ecuación 4 se tomó en este caso como referencia para estructurar un modelo en el cual se incluyó la época de cosecha de los dos cultivares utilizados, obteniendo:

$$\ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{(1 - \alpha)} \right] \right\} = \ln A' + Bq - \left(\frac{E_a}{R} \right) \frac{1}{T} + \ln t \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde E_a es la energía de activación (J/mol), R corresponde a la constante universal de los gases ideales (8,314 J/K mol), q es una variable cualitativa, en este caso concerniente a la edad de cosecha de las raíces, $\ln A'$ y B son los parámetros a ser determinados y tanto $1/T$ como t , variables independientes. Para estimar los parámetros de la ecuación 5, fue usado un módulo de estimación no lineal mediante la aplicación de software estadístico.

Durante procesos de cocción, la textura final de vegetales amiláceos como papas y yuca, depende tanto del almidón como de la pared celular y las modificaciones de la lamela media. El almidón es el principal componente de la materia seca en yuca y durante tratamiento hidrotérmico la gelatinización juega un papel importante en la definición de las características de calidad finales del producto cocido. Raíces como las yucas y tubérculos como las papas exhiben características descritas como harinosa, cerosa y pegajosa y en cocciones prolongadas, el tejido de la raíz se separará radialmente en porciones longitudinales. Generalmente son aceptables tiempos de cocción por encima de 30 minutos, pero cocciones entre 10 y 20 minutos están asociadas con raíces o tubérculos de mejor calidad (Beleia *et al.*, 2006).

En productos horneados, se han estudiado extensamente los cambios del almidón durante el procesamiento y almacenamiento. El calentamiento de los gránulos de almidón en exceso de agua produce hidratación, hinchamiento, fusión de los cristales (T_m) y dispersión de las moléculas de amilosa y amilopectina en la fase acuosa. El almidón disperso empieza a asociarse en una estructura ordenada cuando se mantiene la temperatura por debajo de la temperatura de fusión (T_m). Así los geles de almidón se estructuran, incrementando la firmeza de los productos. El contenido de humedad, la duración del proceso, las condiciones térmicas y esfuerzos cortantes afectan la gelatinización del almidón y su dispersión durante el procesamiento de alimentos. Por

consiguiente, las condiciones térmicas del procesamiento tienen efectos representativos sobre la gelatinización y dispersión de los almidones, afectando significativamente el comportamiento al envejecimiento de los alimentos (Seetharaman *et al.*, 2002).

Muchos productos horneados son elaborados con harina de trigo como el principal ingrediente. Los productos difieren de acuerdo con el tipo y cantidad de ingredientes usados, ayudas en el procesamiento, contenido de humedad en la masa y los perfiles de tiempo – temperatura en el horneo. Aunque hay un buen entendimiento de los principios básicos que gobiernan la calidad y tiempo de vida útil individual de los productos y la habilidad para manipular estas propiedades, aún no está claro el impacto de las propiedades de textura y vida útil como una función de la estabilidad de la estructura durante el procesamiento y el almacenamiento (Seetharaman *et al.*, 2002).

Son conocidos los principios de los cambios en las propiedades del almidón durante el horneo, fusión de los cristales por condiciones hidrotérmicas, rompimiento de la estructura granular del almidón y dispersión parcial de la amilosa y la amilopectina. La amilosa y la amilopectina están dispersas fuera del gránulo (dispersión intergranular) y en cavidades al interior del mismo (dispersión intragranular). La asociación de amilosa aumenta a medida que la concentración de amilosa soluble se incrementa (inter o intragranularmente) y si la temperatura del medio es menor que la temperatura de fusión T_m de los cristales de amilosa. Así mismo, la amilosa se dispersa durante la gelatinización y se asocia para formar un gel insoluble durante el horneo de la mayoría de productos a base de cereales. Por lo tanto, la amilosa contribuye a una fase continua y estructura del producto durante este proceso (Seetharaman *et al.*, 2002).

En el enfriamiento a temperaturas inferiores a la de fusión de la amilopectina (50°C), la amilopectina gelatinizada al interior del gránulo empieza a asociarse. La concentración relativamente alta de amilopectina no gelatinizada, los gránulos de almidón gelatinizados, aumentan la velocidad y extienden las asociaciones de amilopectina – amilopectina y amilosa – amilopectina. La dispersión del almidón en un producto durante el procesamiento depende de las condiciones del proceso y formulación. La mayoría de la amilopectina no está dispersa (permanece intragranular) durante el procesamiento hidrotérmico de los alimentos como resultado de un insuficiente esfuerzo cortante para romper el gránulo de almidón hinchado y gelatinizado. Por lo que la reasociación de la amilopectina durante el almacenamiento ocurre al interior del gránulo remanente gelatinizado (Seetharaman *et al.*, 2002).

En el procesamiento por secado de productos amiláceos, se tiene el Achu, alimento a base de ñame, muy apetecido en países como Camerún, su consumo está generalmente limitado por un número de factores: primero, su procesamiento es tedioso, debido al tiempo requerido e intensidad de la labor y segundo, su materia prima es un tubérculo muy susceptible a podredumbre, llevando a grandes pérdidas, por lo que se han conducido estudios para promover y usar premezclas de harina en la preparación de achu. En el Pacífico, la harina precocida de ñame es preparada por ebullición de las piezas hasta una textura suave, seguida por secado y molienda para obtener finalmente la harina (Njintangy y Mbofung, 2006).

La precocción del ñame así como la temperatura de secado son factores importantes que afectan sus propiedades fisicoquímicas y es tal la necesidad de ser considerados cuidadosamente en la producción de harina de ñame pregelatinizada. En general, la harina de ñame cruda es más estable durante el secado que la harina precocida. Cuando se inicia la gelatinización durante la cocción tiende a continuar durante el secado, sugiriendo así que en la producción de harina precocida, este parámetro sea tenido en cuenta durante el secado. Temperaturas de secado por encima de 60°C y altos tiempos de precocción (> 45 min) reducen considerablemente el índice penetrométrico relativo y la digestibilidad in-vitro del carbohidrato reconstituido de achu. El corte del ñame antes de la cocción tiende a producir achu de pobre consistencia, recomendando usar otros procedimientos de cocción u otros procesos que mejoren la calidad del producto (Njintangy y Mbofung, 2006).

2.2.2 Cinética de cambio de textura de productos vegetales por tratamiento térmico

La máxima calidad y el mínimo de pérdidas durante el procesamiento térmico requiere del conocimiento de las cinéticas de degradación de la textura. Los parámetros cinéticos pueden proveer una valiosa orientación para el entendimiento y predicción de los cambios que ocurren en el procesamiento térmico. Se hace necesario contar con información o cinéticas de reacción de los productos vegetales para una calidad óptima de los productos, es por esto que la medición objetiva de las propiedades de textura bajo diferentes condiciones de proceso es un paso integral en la determinación de las cinéticas de reacción; siendo la firmeza la principal propiedad, además de otras como la gomosidad y la elasticidad, que pueden determinarse analizando curvas de fuerza – distancia y fuerza – tiempo. Se ha usado principalmente el parámetro firmeza en la cuantificación de las cinéticas de degradación de la textura en vegetales porque es la que mejor relaciona la percepción del consumidor (Rizvi y Tong, 1997).

En el análisis de curvas fuerza – tiempo, la firmeza es la máxima fuerza producida bajo compresión de una muestra, caracterización muy similar al efecto de la masticación al comer. Los estudios de cinética se han reportado en una variedad de vegetales, incluyendo zanahorias, pepinos, hongos, olivos, papas y arvejas. La mayoría de los estudios han indicado que la degradación de la textura de los vegetales siguen modelos cinéticos de primer orden. Este modelo es caracterizado por una línea recta cuando el logaritmo de la propiedad de textura se ha medido y graficado contra el tiempo de calentamiento, el cual en la mayoría de los estudios es corto. Adicionalmente, se ha propuesto un mecanismo dual para el modelo cinético de primer orden en el que se describe que hay una región lineal con una pendiente empinada (mecanismo 1) seguido por otra región lineal con una pendiente poco pronunciada (mecanismo 2) (Rizvi y Tong, 1997).

Puesto que el modelo cinético de primer orden no podría describir todos los datos, con base en el mecanismo anterior se ha postulado que ocurren dos reacciones simultáneas de primer orden a dos velocidades diferentes. Se plantea la hipótesis que el mecanismo 1 es debido a un sustrato a y que el mecanismo 2 a un sustrato b , por lo que se introduce la teoría de los dos sustratos, calculando separadamente las constantes de velocidad y la energía de activación (Rizvi y Tong, 1997).

Huang y Bourne, 1983, estudiaron cinéticas de ablandamiento de vegetales enlatados (arvejas, remolacha y zanahoria), buscando determinar particularmente si las velocidades de ablandamiento continúan siendo de primer orden durante el tiempo de proceso. Se evaluó la firmeza un día después del procesamiento utilizando una celda de extrusión en texturómetro Instron Universal, estableciendo la relación entre fuerza de extrusión (kN) y tiempo de proceso (min). Las curvas obtenidas se caracterizan por una pendiente negativa pronunciada que es casi lineal, pero la curva cae a una segunda línea recta con una ligera pendiente negativa a lo largo del tiempo de proceso. Un proceso cinético de primer orden está representado por una gráfica rectilínea en escala semilogarítmica siendo evidente que cinéticas de primer orden no aplican cuando se usan tiempos prolongados de proceso en vegetales enlatados. La forma de las curvas experimentales es similar a las que se obtienen por la suma de dos procesos simultáneos e independientes de primer orden a diferentes velocidades.

Por analogía con la teoría cinética, la porción lineal de la curva semilogarítmica que es obtenida después de un prolongado tiempo de calentamiento (referido como mecanismo 2) da el ablandamiento aparente a velocidad constante para este mecanismo. Cuando la porción lineal del mecanismo 2 es extrapolado hasta el tiempo cero del proceso y la línea extrapolada se resta de la línea por encima de ésta, el resultado es una segunda línea recta con una pendiente más pronunciada (referida al mecanismo 1) y la pendiente de esta línea derivada, da el ablandamiento aparente a velocidad constante para el mecanismo 1 (figura 8). La evidencia de esta cinética indica

que el ablandamiento de los vegetales durante el procesamiento térmico está compuesto de dos mecanismos cinéticos aparentes de primer orden (Huang y Bourne, 1983).

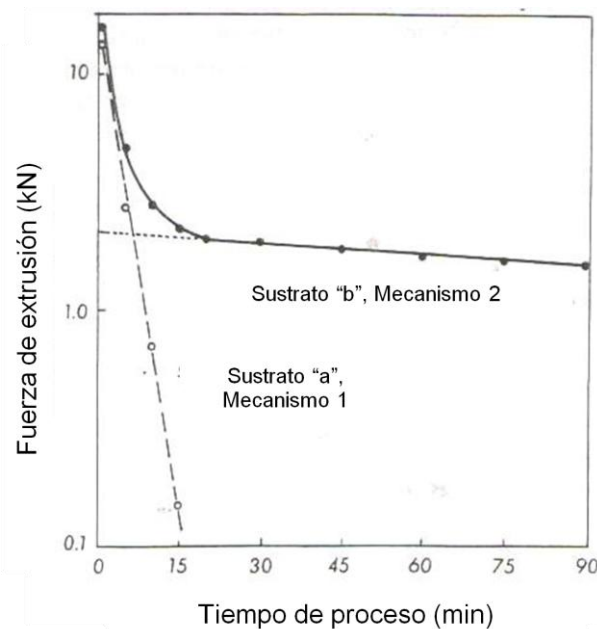


Figura 8. Efecto del tiempo de procesamiento a 104,4°C sobre la firmeza de cubos de remolacha amarilla enlatada. (Los círculos sólidos representan puntos experimentales, los círculos abiertos representan la diferencia entre la línea interpolada y los puntos experimentales)

Fuente: Huang y Bourne, 1983

El intercepto de la extrapolación del mecanismo 2 hasta el tiempo cero, da la cantidad de firmeza en el material crudo que es debida al sustrato b, el cual actúa sobre el mecanismo 2. La diferencia entre este punto y el intercepto del primer punto experimental hasta cero, da la cantidad de firmeza en el material crudo que es provisto por el sustrato a, el cual actúa sobre el mecanismo 1. De acuerdo con la figura 8, la contribución del sustrato a, declina durante el procesamiento hasta que prácticamente desaparece. El sustrato b contribuye virtualmente a toda la firmeza después de un procesamiento prolongado. Este estudio no tiene evidencia que establezca las bases químicas para los dos sustratos y los dos mecanismos de ablandamiento postulados, sin embargo, se teoriza que el mecanismo 1 se debe probablemente a cambios en la pectina a nivel interlamelar porque hay evidencia sustancial que los cambios en las sustancias pécticas están íntimamente involucrados con cambios en la firmeza de acuerdo con van Buren (1979), y Kertesz (1951), citados por Huang y Bourne, 1983. La base química del sustrato b y el mecanismo 2 son aún materia de especulación. La evidencia cinética dada en los puntos de los dos mecanismos de ablandamiento no ha sido previamente asumida, indicando que ninguna suposición para especificar la calidad de la textura de los vegetales no puede usar cinéticas simples de primer orden, excepto para tiempos cortos de calentamiento. Es de interés práctico que luego de cierto tiempo de proceso se produce un ligero deterioro en la firmeza. Se necesita trabajo adicional para precisar más exactamente los valores de las constantes aparentes de velocidad y cómo éstas pueden estar afectadas por variables genéticas, culturales y de procesamiento.

El trabajo conducido por Huang y Bourne (1983) fue el primero en evaluar la cinética de degradación de la textura en vegetales en tiempos prolongados de procesamiento. Otros estudios también reportaron una tendencia dual similar de ablandamiento cuando diferentes vegetales

fueron calentados en tiempos largos de proceso (Bourne, 1987; Heil y McCarthy, 1989; Rahardjo y Sastry, 1993; Van Loey *et al.*, 1994, citados por Rizvi y Tong, 1997). Aunque el modelo del mecanismo dual parecía describir los cambios de las propiedades de textura adecuadamente aún después de un extenso calentamiento, su validez ha sido cuestionada algunas veces, por lo que algunos autores sugirieron que el segundo mecanismo de ablandamiento era referido a una textura en equilibrio, con base en esto y considerando otras hipótesis y teorías, Rizvi y Tong, 1997 redefinieron los parámetros de este tipo de cinética usando una técnica de conversión fraccional, preguntándose si la degradación de la textura bajo calentamiento prolongado estaba mejor caracterizada por un segundo mecanismo o simplemente por un valor de equilibrio.

Para la aplicación de la conversión fraccional, se asume una reacción teórica simple de primer orden, $A \rightarrow B$. En la determinación de la cinética de la reacción es necesario conocer el alcance de la reacción, o la fracción de reactante que ha sido convertida en producto en cualquier tiempo t . La conversión fraccional, f , de una reacción es definida de la siguiente manera (Rizvi y Tong, 1997):

$$\frac{\text{Lo que ha reaccionado en un tiempo específico, } t}{\text{Lo que debe hacerse reaccionar para que la reacción se complete}}$$

Cuando la concentración del reactante como una función del tiempo es conocida, f puede expresarse matemáticamente así:

$$f = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_\infty} \text{ Ecuación 6}$$

Donde C_0 es la concentración inicial en el tiempo 0, C_t es la concentración en el tiempo, t ; C_∞ es la concentración cuando el tiempo de reacción es muy largo hasta que la reacción se ha completado.

Cuando una propiedad física del sistema de reacción es medida como una función del tiempo, f es definido como:

$$f = \frac{P_0 - P_t}{P_0 - P_\infty} \text{ Ecuación 7}$$

Donde P_0 es la propiedad física inicial en el tiempo, 0; P_t es la propiedad física en el tiempo, t ; P_∞ es la propiedad física en un tiempo prolongado. En la definición de la conversión fraccional las ecuaciones 6 y 7 tienen en cuenta la posibilidad de valores distintos a cero para C_∞ y P_∞ . En la mayoría de las reacciones irreversibles de primer orden C_∞ se aproxima a cero cuando la reacción se completa y la ecuación 6 puede reducirse a:

$$f = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \text{ Ecuación 8}$$

Para una reacción de primer orden, al graficar el logaritmo de $1 - f$ contra el tiempo podría generar una línea recta con una constante de velocidad expresada por la pendiente negativa:

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = \ln (1 - f) = -kt \text{ Ecuación 9}$$

Aunque C_∞ puede ser aproximadamente cero, P_∞ a menudo no podría serlo porque el producto también podría tener la misma característica física como el reactante. Por ejemplo, la mayoría de los vegetales llegan a ser muy suaves luego de tiempos prolongados de calentamiento a elevadas temperaturas, sin embargo, retienen algún grado medible de firmeza. De la siguiente forma la

conversión fraccional puede usarse en la determinación de las cinéticas de degradación de la textura:

$$\ln(1 - f) = \ln\left(\frac{F_t - F_\infty}{F_0 - F_\infty}\right) = -kt \text{ Ecuación 10}$$

Donde F_0 es la firmeza inicial en el tiempo, 0; F_t es la firmeza en el tiempo, t ; F_∞ es la firmeza en el equilibrio o la máxima retención de la firmeza distinta de cero.

La degradación de la textura puede ser modelada como una reacción de primer orden solamente si existe una relación lineal cuando se grafica el logaritmo de $1 - f$ contra el tiempo. La constante de velocidad puede ser determinada de la pendiente de la regresión lineal (Rizvi y Tong, 1997).

La técnica de conversión fraccional siempre ha sido utilizada en el estudio de las cinéticas de gelatinización del almidón, las cuales también siguen reacciones de primer orden. La degradación de la textura y la gelatinización del almidón son similares en que el alcance de la reacción no puede ser definido en términos de concentración y el uso de métodos o medidas indirectas de las propiedades físicas es necesario para estimar el grado de conversión (Rizvi y Tong, 1997).

Otros estudios del ablandamiento térmico de alimentos indican que se evidencian expresiones cinéticas de primer orden, convenientes para expresar el grado de ablandamiento a una temperatura constante. El efecto de la temperatura en el ablandamiento se puede expresar por una relación de Arrhenius (Rao y Lund, 1986).

Datos cuantitativos instrumentales sobre el grado de cocción son esenciales para determinar el tiempo óptimo de este proceso, aunque tradicionalmente la cocción se realiza casi en forma exclusiva en agua en ebullición, actualmente el horneo, la cocción en microondas y con vapor a presión se emplean en la industria de alimentos, en los servicios de alimentación y a nivel doméstico. La constante de la velocidad de reacción y el tiempo de residencia pueden ser procesados para calcular el grado de cocción y compararse con puntos fijos que representen vegetales óptimamente cocidos. Igualmente, los estudios sobre cinéticas de cocción podrían incluir un amplio rango de temperaturas y tiempos (Álvarez y Canet, 2002).

Álvarez y Canet, 2002, indican igualmente, que la velocidad de ablandamiento del tejido vegetal tiene un ajuste de los datos a modelos cinéticos de primer orden, representada en gráfica semilogarítmica de las propiedades reológicas versus tiempo, con comportamiento rectilíneo, aunque también modelos de segundo orden pueden emplearse en el manejo de datos obtenidos en pruebas de textura que involucren fuerza de cizalla.

2.2.3 Estudios en propiedades reológicas de productos vegetales

El almidón de los tubérculos y las raíces presenta una fuerte elevación de la viscosidad durante el cocimiento, mucho mayor que el de los cereales. Los gránulos de almidón de papa, yuca y maíz ceroso presentan picos de viscosidad más altos que los de maíz y trigo. Esto es debido a que los almidones de papa, yuca y maíz ceroso tienen mayor capacidad de absorción de agua, mayor velocidad de hidratación y se desintegran más rápidamente.

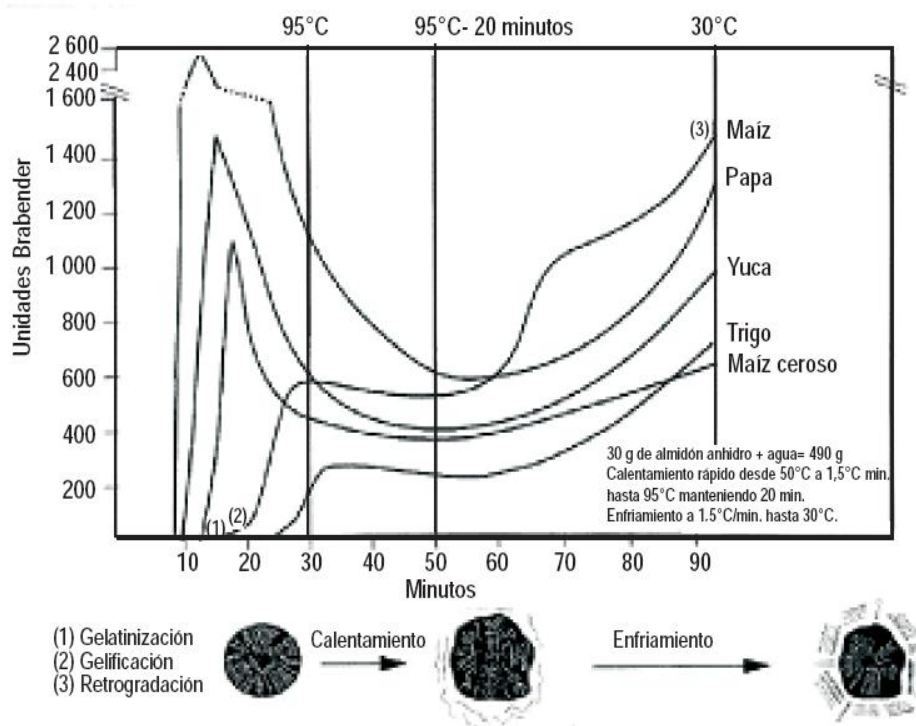


Figura 9. Perfil de viscosidades de diferentes almidones mediante viscoamilógrafo Brabender
Fuente: Aristizábal y Sánchez, 2007

La figura 9 muestra las curvas de viscosidad de diferentes almidones nativos generadas por un viscógrafo. Los valores de viscosidad pueden variar con la temperatura, velocidad y concentración de la solución de almidón utilizada en el equipo. El almidón de maíz muestra un rápido incremento de la viscosidad después de la gelatinización, hasta llegar a un punto máximo. La viscosidad disminuirá gradualmente durante el período de mantenimiento de la temperatura y posteriormente tendrá un incremento muy fuerte mientras la pasta se enfría y retrograda. El almidón de maíz ceroso prácticamente no tiene moléculas lineales de amilosa, es altamente estable y resistente a la retrogradación; al contrario, los almidones con alto contenido de amilosa tienen una retrogradación muy rápida. Su pasta permanecerá fluida y clara e incrementará su viscosidad más rápidamente que el maíz regular, su viscosidad máxima será mayor y se obtendrá más rápidamente produciendo pastas con poco cuerpo y muy cohesivas. El rompimiento será más rápido y acentuado. En el enfriamiento se presenta un ligero aumento en la viscosidad ya que no gelifica ni presenta sinéresis (Aristizábal y Sánchez, 2007).

El almidón de papa absorbe más agua mostrando un máximo inicial mayor. Su temperatura de gelatinización es menor, debido a que los grupos éster-fosfato presentes en el gránulo de papa tienden a debilitar los enlaces provocando un espesamiento más rápido al calentarse. El máximo pico de viscosidad cae rápidamente durante el mantenimiento de la temperatura. La solución muestra poca tendencia a retrogradarse durante el enfriamiento. El almidón de yuca gelatiniza a la misma temperatura del almidón de maíz y del almidón de maíz ceroso, a temperaturas relativamente bajas (62 - 73°C); el pico máximo es alcanzado rápidamente, lo que implica que es un almidón fácil de cocinar y requiere menor consumo de energía durante su cocción. Además, tiene una tendencia baja a la retrogradación y produce un gel de mayor claridad y estabilidad en comparación con el de otros almidones nativos. Su temperatura de gelatinización (63°C) es similar a la del almidón de papa, pero está por debajo de las temperaturas de gelatinización de los cereales (74 - 81°C). Aunque la viscosidad de la pasta es inicialmente alta, ésta decae

bruscamente con agitación continuada por encima de 90°C y con un subsecuente enfriamiento no hay formación de gel (Aristizábal y Sánchez, 2007).

Si un almidón muestra un alto poder de hinchamiento y alta solubilidad esto refleja la baja fuerza de asociación en los gránulos. El poder de hinchamiento de los almidones de cereales es más limitado que el que se observa para los almidones de tubérculos. La capacidad de absorción de agua depende directamente del tipo de almidón, lo que es mayor en almidones de tubérculos que con almidones de cereales, pero también depende de factores como el contenido de amilopectina, el tamaño y la forma de los gránulos. La solubilidad del almidón de yuca es alta, similar al del almidón de papa mientras que en los almidones de cereales se reduce debido a la presencia de lípidos (Aristizábal y Sánchez, 2007).

La reología en almidones es particular en cada caso, pues depende de las condiciones experimentales, es decir, incluye la preparación de las muestras, el perfil térmico, la presencia o ausencia de iones, etc. El aspecto más importante evaluado es el comportamiento de flujo y su comportamiento viscoelástico. Se ha descrito que las mediciones viscoelásticas dinámicas han provisto un excelente medio para estudiar los cambios reológicos ocurridos durante los procesos de gelatinización y retrogradación de dispersiones acuosas de almidón. Las pruebas oscilatorias de baja deformación permiten medir sin interrumpir o destruir la estructura del gel, son muy útiles en la descripción de los cambios dependientes del tiempo y la temperatura. Las pastas de almidón o los geles tienen propiedades viscosas (como fluidos) y elásticas (como sólidos), mostrando así un comportamiento viscoelástico (Casarrubias *et al.*, 2007).

En el desarrollo de una caracterización parcial de almidones nativos de diferentes fuentes, provenientes de cereales (maíz y cebada) y frutos (mango y plátano), se realizó un estudio morfológico y molecular empleando microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, así como un estudio reológico, llevando a cabo las mediciones oscilatorias de baja deformación. Se muestra que la fuente de almidón es un factor importante en las características tanto morfológicas como reológicas de los materiales evaluados. Los gránulos observados a través de microscopía electrónica de barrido fueron de diferentes tamaños y formas (elíptica, poliédrica); sin embargo, en los resultados de difracción de rayos X, todas las muestras presentaron un patrón tipo A. En cuanto a los resultados reológicos, en todas las muestras predominó el módulo de almacenamiento, siendo mayor el comportamiento elástico y los geles formados con el almidón de cebada fueron similares a los obtenidos con los almidones provenientes de los frutos. A pesar de presentar un tamaño de gránulo menor, la cantidad de material lixiviado permite conformar geles estables (Casarrubias *et al.*, 2007).

Los materiales que presentan esta propiedad, se caracterizan por la presencia de una estructura tridimensional incompleta, que se afecta por la aplicación de un esfuerzo y sólo se recupera cuando el esfuerzo es parcialmente removido. Mientras más completa y resistente a la ruptura sea la estructura, más pronunciada es su elasticidad y mientras más fácil se rompa, mayor es su comportamiento viscoso. Estas pruebas consisten en obtener un barrido de deformación (o esfuerzo, según sea el caso), para determinar los límites del comportamiento viscoelástico lineal de la muestra, dado que en la región lineal, las propiedades reológicas no son dependientes de la deformación ni del esfuerzo. Se procede a obtener un barrido de frecuencia, el cual señala los cambios en el comportamiento elástico y viscoso del material, con el tiempo de aplicación de la deformación o del esfuerzo. Los resultados de los experimentos dinámicos son representados por los módulos de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') (Casarrubias *et al.*, 2007).

Se ha reportado en papas (*Solanum tuberosum* L) que la abundancia de almidón en las células y la forma y el tamaño de los gránulos de almidón son importantes para la textura final, así como la estructura de los polímeros de la pared celular. Algunos factores que influyen en la textura de papa cocida son: sólidos totales del tejido, contenido de almidón, tamaño del gránulo de almidón, tamaño de la pared del parénquima, naturaleza y contenido de sustancias pécticas. Además, las

características microestructurales influyen directamente en las características de textura de los materiales alimentarios vegetales. Cuando se aplica a una estructura una fuerza, se indica que es una red o una interconexión de células, un rompimiento o ruptura ocurre en el punto de mínima resistencia. En este sistema cualquiera de las células puede separarse a través de la lamela media o las células pueden estallarse, dependiendo la fuerza aplicada sobre la lamela media (Narpinder *et al.*, 2005).

Usualmente las papas crudas presentan ruptura celular, mientras que en las cocidas unas muestran separación celular como resultado de la desestabilización térmica de los materiales pécticos. Los cambios en textura que ocurren durante el procesamiento térmico y la cocción en papas y productos derivados de éstas están principalmente asociados con el comportamiento de la gelatinización y retrogradación del almidón, el cual representa en el tubérculo el componente predominante de la pared celular y de los componentes estructurales de la lamela media (Narpinder *et al.*, 2005).

En productos como el puré de papa (Hopkins y Gormley (2000), citado por Rodríguez^d *et al.*, 2008), se evaluaron los efectos de la congelación de gránulos de almidón en forma in-situ, sobre las propiedades del almidón y se observó que el almidón congelado incrementa el grado de retrogradación y estabilidad de la pasta cocida. Los geles resultantes tuvieron alta fuerza de compresión pero bajos valores de corte y adhesividad, que los gránulos que no fueron congelados. Se ha examinado igualmente la transformación del almidón y su rol en el desarrollo estructural en purés preparados por reconstitución de hojuelas de papa, encontrándose que el comportamiento reológico del puré está determinado por la extensión de la cohesión celular y su integridad, así como por la cantidad y composición del almidón extracelular lixiviado en la fase continua (Lamberti *et al.* (2004), citado por Rodríguez^d *et al.*, 2008).

Rodríguez^d *et al.*, 2008, citan estudios de otros investigadores, en los que se han caracterizado las propiedades de textura de purés naturales de papa, indicando que los parámetros del perfil de textura (TPA) y de firmeza fueron más bajos en muestras congeladas y descongeladas que en muestras frescas. Algunos estudios además han efectuado deformaciones con pruebas de estrés / relajación sobre tubérculos, con el fin de investigar el efecto de las condiciones del procesamiento. Igualmente se ha evaluado la textura y las propiedades estrés / relajación de papas cocidas, reportando que un modelo de dos elementos tipo Maxwell con un amortiguador adicional en serie fue capaz de describir su comportamiento de relajación.

En el estudio de la textura de vegetales, es necesario un método objetivo y numéricamente apropiado para medir la textura y comparar muestras. En un estudio sobre los cambios en el brócoli durante diferentes tratamientos de cocción fue usado un reómetro y se procedió a un análisis de fractura, la figura 10 muestra los perfiles y valores reológicos de las muestras de brócoli bajo diferentes tratamientos de cocción (Chun-Hsien y Chi-Yue, 2005).

Pico de fuerza (g):	829,0	1480,0	412,0	939,0
2 mm de profundidad (g):	697,0	1438,0	359,0	932,0
4 mm de profundidad (g):	137,0	967,0	121,0	561,0
Fragilidad a la ruptura (g):	827,0	1479,0	410,0	938,0
Esfuerzo de fluencia (g/mm ²):	3316,0	5290,0	1648,0	3756,0

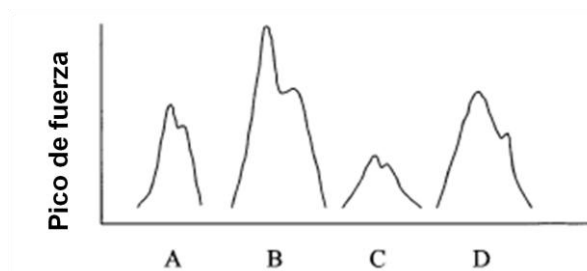


Figura 10. Perfiles y valores reológicos obtenidos para muestras de brócoli sometidas a diferentes tratamientos de cocción en agua destilada. Tratamientos de cocción: A, fresco; B, 50°C, 10 min; C, ebullición, 8 min; D, 50°C, 10 min + ebullición por 8 min

De los valores reológicos, puede observarse que la muestra directamente cocida en agua en ebullición por 8 minutos tuvo el menor valor de fuerza de pico (412 g) y la muestra cocida a 50°C por 10 minutos tuvo el valor más alto (1480 g). Puede verse que el pico de fuerza está aparentemente correlacionado de manera positiva con el valor asociado al carácter quebradizo. Sin embargo, el pico de fuerza fue usado para el índice de textura en las muestras de brócoli estudiadas.

La figura 11 muestra los cambios de textura en las muestras de brócoli durante 1 hora de cocción en agua destilada a diferentes temperaturas.

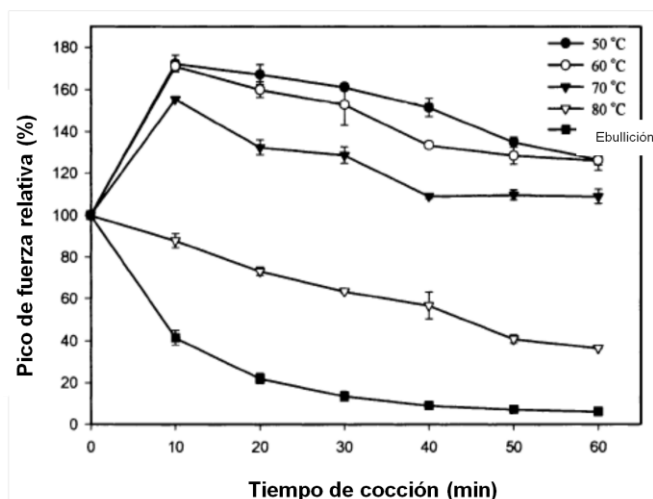


Figura 11. Cambios en el pico relativo de fuerza de muestras de brócoli durante 1 hora de cocción en agua destilada a diferentes temperaturas

De acuerdo con la figura anterior, a 80°C y en el punto de ebullición, el pico de fuerza relativa de las muestras disminuyó rápidamente con el incremento del tiempo de cocción. Sin embargo, cuando las muestras fueron cocidas a 50, 60 y 70°C por 10 minutos, el respectivo pico de fuerza relativa se incrementó. Las muestras cocidas a 50 y 60°C por 10 minutos tuvieron 1,7 veces el

valor del pico de fuerza relativa del tejido fresco. Estos resultados revelan que un tratamiento de cocción apropiado puede incrementar el pico de fuerza relativa del tejido vegetal y puede hacerlo más quebradizo, lo cual es preferido por los consumidores.

La figura 12 exhibe cambios en la textura en las muestras del brócoli durante precocción (0 ~ 60 minutos) en agua (50 ~ 70°C), seguido de cocción (8 minutos) en agua a ebullición.

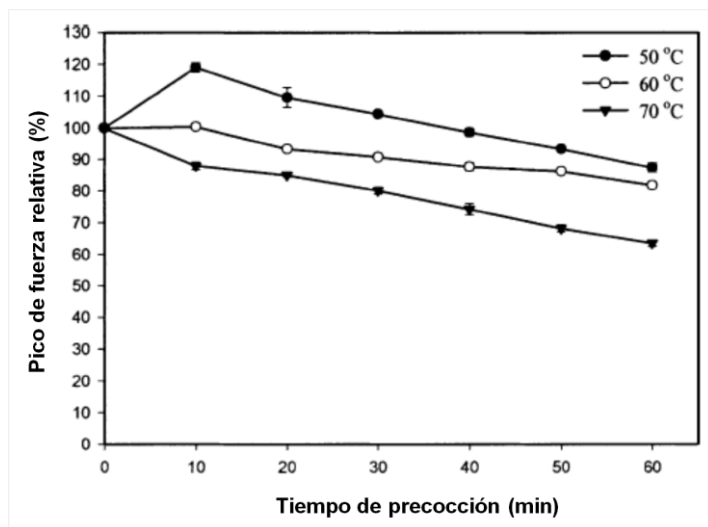


Figura 12. Pico de fuerza relativa en muestras de brócoli con precocción (0 – 60 min), en agua (50 – 70°C), seguido de cocción (8 min) en agua en ebullición

Los resultados indican que el brócoli precocido a 50, 60 o 70°C por 10 a 60 minutos y posteriormente cocinado en agua en ebullición muestra un gran pico de fuerza relativo que cuando se cocina directamente sin precocción. Particularmente, la muestra de brócoli precocida a 50°C por 10 minutos y cocinada en agua en ebullición por 8 minutos tuvo un pico de fuerza relativo del 119%, el cual es mucho más grande que el 51% correspondiente a la muestra cocinada directamente en agua en ebullición sin precocción. Los resultados de las evaluaciones referidas revelan que un tratamiento de precocción puede mantener la textura del brócoli e incrementar su resistencia a ablandarse durante la cocción en agua en ebullición (Chun-Hsien y Chi-Yue, 2005).

Algunos estudios han considerado las masas de los tubérculos como geles de almidón, aplicando teorías reológicas para geles. Los geles de almidón pueden ser vistos como una mezcla polimérica hidratada en la cual los gránulos de almidón están embebidos en una matriz continua de cadenas físicamente entrecruzadas de amilosa. Otros autores han considerado que este tipo de masas son como un sistema disperso, consistente principalmente de células individuales enteras así como de células rotas y fragmentos celulares suspendidos en una fase de almidón extracelular. Se ha aceptado que ambos, la fase continua (amilosa) y las células o gránulos hinchados, contribuyen a las propiedades mecánicas del gel (Rodríguez^d et al., 2008).

2.2.4 Estudios en musáceas

Con el fin de conocer los usos potenciales de las musáceas colombianas en el sector industrial de alimentos, se han realizado trabajos de cooperación institucional entre la Universidad del Valle y centros de investigación como el CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) y el CIRAD

(Centre de coopération Internationales en Recherche Agronomique pour le Développement) teniendo:

✱ Caracterización de propiedades físicas y funcionales de musáceas colombianas, trabajo que ha permitido dar a conocer la diversidad existente en los plátanos consumidos en Colombia, a nivel físico en cuanto a tamaño del racimo, peso de manos, peso y forma de los dedos; y en el aspecto funcional de la pulpa, estableciendo las diferencias entre variedades y manos de un mismo racimo. Las evaluaciones de las características físicas con y sin cáscara, permiten destacar las variedades con un gran potencial de aprovechamiento agroindustrial como FHIA 21, Dominico Hartón, Hua Moa, Guayabo, África y Hartón. Igualmente, los geles obtenidos a partir de harinas permiten poner en evidencia una variabilidad del comportamiento a la cocción de los diferentes cultivares (figura 13). La temperatura de inicio de la gelatinización varía entre 68 hasta temperaturas cercanas a los 76°C. Siendo los plátanos de cocción los que presentan las temperaturas más altas de gelatinización: Guayabo (71,4°C), FHIA 25 (72,1°C), Pelipita (72,9°C), Dominico Hartón (72,9°C), África (74,2°C), Cubano Blanco (75,4°C) y Hartón (75,7°C). La variabilidad de la viscosidad máxima por variedad, fluctúa entre 1780 y 2640 cP. Las variedades FHIA 25, Gross Michel, Rollizo, Dominico Hartón y Guineo, tienen mayor viscosidad en la cocción (Dufour^a *et al.*, 2007).

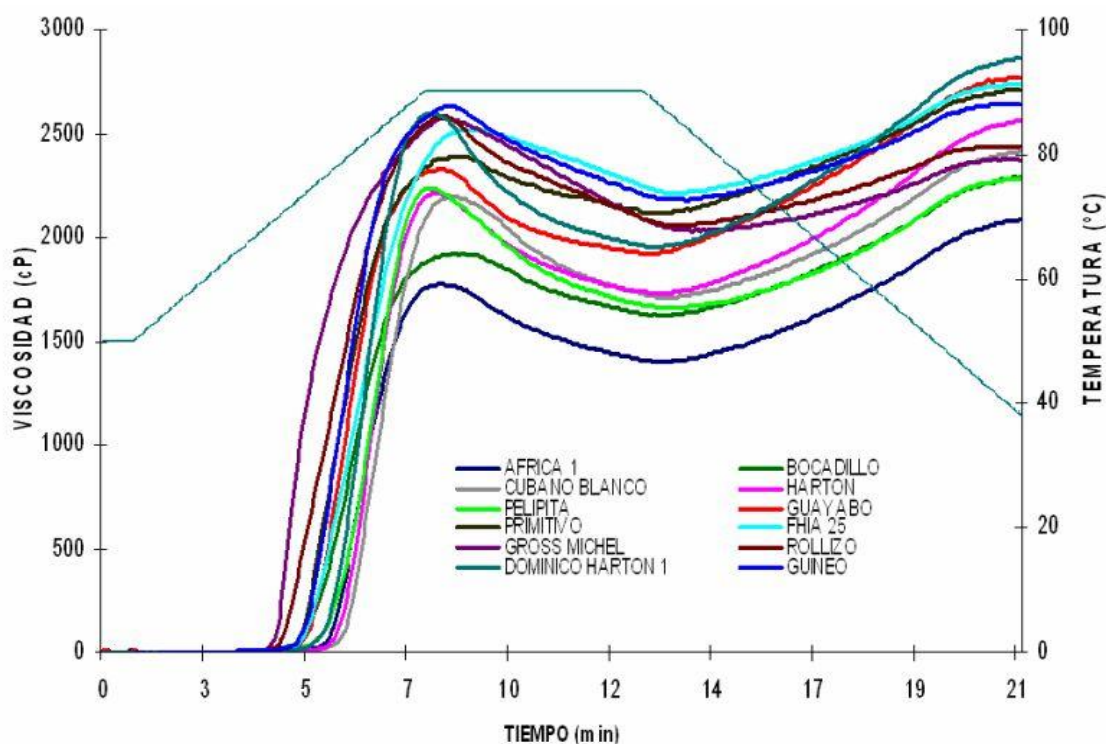


Figura 13. Variación de los perfiles de viscosidad de doce variedades de musáceas Colombianas
Fuente: Dufour^a *et al.*, 2007

✱ En la determinación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los bananos de postre, plátanos de cocción y FHIA híbridos consumidos en Colombia, se encontró que los plátanos de cocción son más grandes, incluyendo longitud y diámetro que los bananos de postre. La temperatura de gelatinización (onset) del almidón varía entre 59,7 y 67,8°C, lo que permite diferenciar los grupos, en orden ascendente se tiene, bananos de postre (63,2°C), banano de cocción (65,7°C), híbridos FHIA (66,6°C) y plátanos, subgrupo Plantains (67,1°C). Además, los

plantains necesitan más energía para poder gelatinizar y tardan más para cocinarse y ablandarse. Con relación a las propiedades funcionales, a pesar de ser más difíciles de cocinar, las harinas de plátano desarrollan más rápido su viscosidad máxima comparadas con las de bananos de postre a partir del momento en el que inicia la formación de pasta; este fenómeno se puede explicar en parte por la temperatura superior necesaria a la formación de pasta de los almidones de los plátanos de cocción y por una temperatura superior para llegar al máximo de viscosidad. Finalmente, el subgrupo Plantain, tiene la materia seca, la temperatura de formación de pasta, la temperatura de gelatinización (onset), el contenido de amilosa, así como los criterios morfológicos, más grandes de todos los tipos de plátanos estudiados. Los Híbridos FHIA de cocción presentan un perfil muy similar, exceptuando el porcentaje de cáscara, de tamaño y de facilidad de cocción (Dufour^b *et al.*, 2008).

2.2.4.1 Almidón en musáceas

La pulpa de los plátanos (AAB y ABB) contiene más almidón y ácidos orgánicos que los bananos (AAA), siendo el genoma B el que da al fruto esta característica. El carbohidrato predominante en el fruto verde de plátano es el almidón (Cayón *et al.*, 2000) con contenidos de 19,4% y 30,0% en peso fresco en bananos y plátanos, respectivamente (Qi *et al.*, 2000). En plátanos como el Hartón, la pulpa fresca del fruto verde contiene 62,4% de agua, 23,3% de almidón y 2,1% de glucosa. Los tejidos de la cáscara también contienen almidón (alrededor de 3% del peso fresco) y muestran cambios similares en los carbohidratos durante la maduración. La sacarosa necesaria para la síntesis del almidón en la pulpa de los frutos en formación proviene, en su mayoría, de la fotosíntesis foliar y muy poco de la fotosíntesis realizada por la cáscara, porque la actividad fotosintética de las hojas del plátano es muy superior que la de la cáscara de los frutos en formación como consecuencia de la muy baja densidad estomática de la cáscara comparada con la de las hojas (Cayón *et al.*, 2000).

Los cambios en los carbohidratos durante la maduración de frutos tropicales y subtropicales son de naturaleza similar. Los bananos y plátanos son cosechados en el estado de madurez fisiológica (verdes) y durante la maduración disminuyen el almidón y aumentan la fructosa, glucosa y sacarosa en la pulpa del fruto. Después de cosechado el fruto y hasta alcanzar su estado de maduración, se reduce la concentración de almidón, conservando el fruto en senescencia una cantidad considerable de almidón, ocurriendo simultáneamente la síntesis de azúcares, los cuales se incrementan hacia el final del climaterio, indicando cambios acentuados en la actividad respiratoria del fruto. En el plátano la hidrólisis del almidón a azúcares y la desaparición de la acidez durante la maduración ocurren a una tasa menor que la que se presenta en banano. Los plátanos en estado maduro tienen mayor concentración de almidón que los bananos, pero su nivel depende del cultivar (Cayón *et al.*, 2000). Los cambios en la composición de almidón para plátano pueden apreciarse en la tabla 8.

Tabla 8. Cambios de la composición de plátanos en la maduración

Color	Características	Almidón	Azúcares
1	Verde	21,5 – 19,5	0,1 – 2,0
2	Verde con huellas de amarillo	19,5 – 16,5	2,0 – 5,0
3	Más verde que amarillo	18,0 – 14,5	3,5 – 7,0
4	Más amarillo que verde	15,0 – 9,0	6,0 – 12,0
5	Sólo puntas verdes	10,5 – 2,5	10,0 – 18,0
6	Todo amarillo	4,0 – 1,0	16,5 – 19,5
7	Pequeñas áreas de color café	2,5 – 1,0	17,5 – 19
8	Grandes áreas de color café	1,5 – 1,0	18,5 – 19,0

Fuente: Badui, 1999

En bananos, su composición cambia dramáticamente durante la maduración, clasificando de ocho a nueve los estados de madurez de acuerdo con el color de la cáscara. En la transformación del almidón a sacarosa durante la maduración están involucradas algunas enzimas así como más de una vía bioquímica, por lo que se hace necesario procesar el banano verde para la producción de almidón tan pronto es cosechado. A pesar de la importancia de esta transformación en términos de la fisiología del fruto, se conoce poco sobre el mecanismo involucrado (Zhang *et al.*, 2005).

Con relación a la forma y tamaño, los gránulos de almidón de varios tipos de bananos al ser vistos en microscopio aparecen como óvalos elongados con surcos. Los ejes principales tienen un rango de 6 a 80 μm y la mayor parte está entre 20 y 60 μm . La superficie de los gránulos de almidón de banano verde aparecen lisos, mientras que los de banano maduro tienen estrías paralelas, quizás debido al desgaste. Esto posiblemente muestra que algunas áreas son más difíciles de hidrolizar que otras (regiones cristalinas aparecen después de una hidrólisis o digestión parcial). Además, los gránulos pequeños desaparecen más rápidamente durante la maduración que los gránulos grandes, presumiblemente se deba a su gran área superficial (Zhang *et al.*, 2005). Los almidones de plátano tienen un amplio rango de tamaños de gránulo, caracterizados por formas extremas, tales como gránulos irregulares esferoides y elongados, con tamaños comprendidos entre 10 – 50 μm , características que son similares a las encontradas en los almidones de banano (Pacheco-Delahaye *et al.*, 2008), aunque Zhang *et al.*, 2005, reportan un tamaño de 7,8 – 61,3 μm con un diámetro promedio de 26 μm como puede apreciarse en la figura 14.

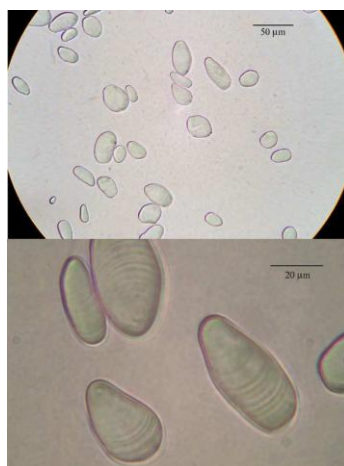


Figura 14. Fotografía de gránulos de almidón de plátano verde
Fuente: Zhang *et al.*, 2005

Teniendo en cuenta otros almidones de musáceas como el procedente del banano verde de la variedad Valery, éste fue comparado en relación con las condiciones de poder de hinchamiento y porcentaje de solubilidad con otros almidones (yuca, papa y sorgo) como se muestra en la figura 15.

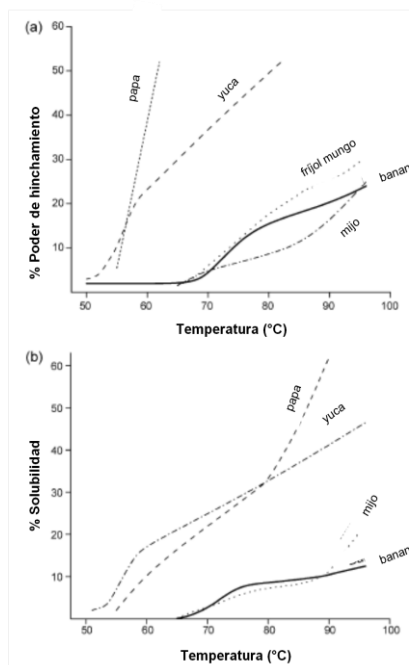


Figura 15. Patrones de hinchamiento (a) y solubilidad (b) de almidón de banano verde (Valery) comparado con almidones para otros propósitos
Fuente: Zhang *et al.*, 2005

El banano Valery presenta dos estados de hinchamiento (parte a); y la solubilidad del almidón de este tipo de banano comparado con el de yuca, papa y mijo fue cercano al del mijo y mucho más bajo que los almidones de yuca y papa.

En la figura 16 puede apreciarse como los gránulos de almidón del banano Cavendish son variables tanto en forma como en tamaño y exhiben una superficie agrietada cuando se calientan en agua a 65°C, progresando enormemente el hinchamiento, la deformación y desgaste entre 70 y 90°C.

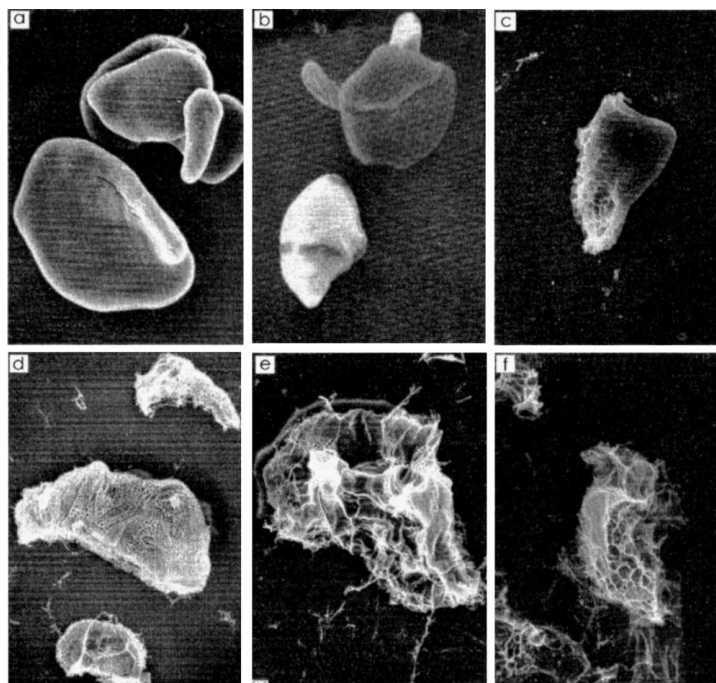


Figura 16. Micrografías por barrido electrónico con magnificación cercana a 1100x de gránulos de almidón de banana verde Cavendish (a) temperatura ambiente, (b) 65°C, (c) 70°C, (d) 75°C, (e) 85°C, (f) 90°C

Fuente: Zhang *et al.*, 2005

Con respecto a otros trabajos de investigación, en el realizado por Eggleston *et al.*, en 1992, se evaluaron cuatro variedades de plátano, cuatro de plátanos híbridos y dos de bananos tipo cocción procedentes de Nigeria, encontrando que los almidones de plátanos, híbridos de plátano y bananos de cocción tienen gránulos con formas y tamaños irregulares, los cuales son altamente compactos y resistentes al ataque de la α -amilasa y tienen relativamente bajo contenido de amilosa; así mismo, exhiben restricción al patrón de hinchamiento, con gran estabilidad y poca retrogradación. Sin embargo, las diferencias en propiedades fisicoquímicas se han observado entre almidones de frutos de *Musa*. Los almidones de los plátanos representan ampliamente un grupo químico y molecularmente homogéneo con algunas características heterogéneas en la estructura granular. Los almidones de los híbridos también representan un grupo molecularmente homogéneo pero con diferencias en otras propiedades químicas y físicas. Las propiedades fisicoquímicas varían considerablemente entre el genotipo ABB, para los almidones de los bananos de cocción estudiados, sus altas temperaturas de gelatinización y formación de pasta, así como una pronunciada restricción al patrón de hinchamiento, sugiere estructuras más ordenadas y gránulos unidos más fuertemente.

En Nigeria, dos variedades son fácilmente identificables, la variedad blanca (ogede fufun) y la amarilla (ogede pupa). Estas dos variedades tienen frutos diferentes en la forma y características de maduración. El fruto del plátano blanco tiende a ser más largo, mientras que el fruto del plátano amarillo es más grande. Cuando la pulpa es mezclada con agua, el sobrenadante de la pulpa del plátano amarillo es naranja, mientras que el del plátano blanco es grisáceo. Aunque hay reportes sobre las propiedades de los almidones del plátano, no ha habido ningún reporte sobre las propiedades de los almidones de estas dos variedades locales de plátano. Este trabajo tuvo como propósito estudiar las propiedades fisicoquímicas de almidones de plátano blanco y amarillo, para

ver si las diferencias en las características del fruto estaban expresadas en las propiedades fisicoquímicas del almidón (Nwokocha y Williams, 2008).

Los gránulos de almidón aislados de los frutos de plátano blanco y amarillo difirieron en morfología y tamaño, siendo bimodal el almidón de plátano blanco. Los almidones también fueron diferentes fisicoquímicamente, exhibiendo el almidón del plátano amarillo menor temperatura de gelatinización, mayor pico de viscosidad, inestabilidad del gel más alto y velocidad de retrogradación ligeramente más alta. Los parámetros reológicos muestran que el almidón de plátano blanco tiene más altos el esfuerzo de fluencia, así como la viscosidad de pasta fría y está mejor estructurado para resistir esfuerzos cortantes (Nwokocha y Williams, 2008).

Teniendo en cuenta que la gelatinización es una propiedad funcional de interés para el almidón presente en los productos alimenticios, Nwokocha y Williams, 2008, analizaron este comportamiento mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), preparando suspensiones al 10% (almidones de las variedades de plátano blanco y amarillo), cuyas curvas se presentan en la figura 17.

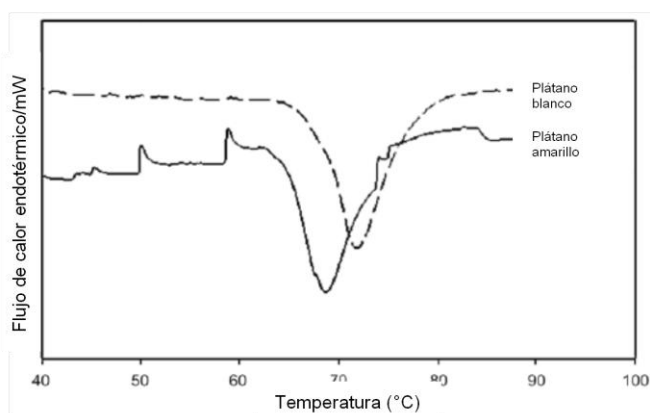


Figura 17. Termogramas por DSC de almidones de plátano blanco y amarillo

Fuente: Nwokocha y Williams, 2008

Ambas curvas presentan un pico endotérmico el cual es atribuido al proceso de gelatinización. Se obtuvo una temperatura de gelatinización más alta en el almidón de plátano blanco (71,88°C) comparado con el almidón del plátano amarillo (68,88°C). La entalpía de gelatinización fue mucho más baja en el almidón de plátano amarillo (8,59 J/g) que el almidón de plátano blanco (15,02 J/g), encontrándose estos valores dentro del rango reportado por otros autores. La diferencia en la temperatura de gelatinización para estos almidones se ha atribuido al rol de tres factores, la composición del almidón, la estructura molecular de la amilopectina y la arquitectura del gránulo. Además, el rango de gelatinización reportado depende de la diferencia en el grado de heterogeneidad de los cristalitas dentro de los gránulos de almidón. Adicionalmente, los bajos valores en la temperatura y entalpía de gelatinización para el almidón del plátano amarillo, son indicativos de su débil estructura granular (Nwokocha y Williams, 2008).

En un trabajo de investigación en la modalidad de tesis doctoral, sobre caracterización del almidón en frutos de *Musa*, procedentes de países como República Dominicana, Jamaica y Colombia, se emplearon técnicas de análisis instrumental como la microscopía de transmisión electrónica (TEM, por su sigla en inglés), en donde se observó que las membranas de amiloplasto alrededor de los gránulos de almidón en bananos tipo postre fueron extremadamente frágiles, estas membranas fueron removidas durante la etapa de mezclado en el procedimiento de aislamiento del almidón. La apariencia física de los gránulos de almidón durante las cuatro etapas involucradas en el

procedimiento de aislamiento empleado no causaron cambios. Mediante microscopio óptico de luz se estableció que los gránulos eran asimétricos y en forma de concha, aunque los gránulos del almidón de plátano y de los bananos de cocción parecían estar ligeramente más elongados u ovoides en comparación con los gránulos de almidón de los bananos tipo postre. Además, los rangos de tamaño de partícula de los almidones de las *Musa* fueron similares, independiente del tipo o país de origen (Steele, 1997).

Los resultados anteriores sugieren además, que los gránulos de almidón de los diferentes tipos de *Musa* estudiados poseen características físicas y estructurales similares. Con base en lo obtenido, las propiedades de formación de pasta de los diferentes tipos de *Musa* probablemente estarían determinadas principalmente por las características moleculares finas de los polímeros de almidón, particularmente la amilosa (y su asociación molecular). Una conclusión generada de este estudio indica que se requiere más información acerca de las características moleculares finas de la amilosa y la amilopectina, usando para ello técnicas de análisis más sensibles que las empleadas, con el fin de determinar si hay diferencias moleculares distinguibles entre los almidones de las diferentes *Musas* los cuales causan que la formación de pasta sea de diversas formas (Steele, 1997).

Así mismo, los almidones del plátano y del banano exhibieron modelos tipo C por difracción de rayos X. Esto indica que los arreglos estructurales de los polímeros del almidón dentro de los gránulos de las diferentes *Musas* son similares. Además, el almidón del plátano tuvo un contenido parecido de amilosa al almidón de los bananos para cocción, lo cual fue un poco más alto que para los almidones de los bananos tipo postre. En términos generales, las características estructurales y moleculares de los diferentes almidones de las *Musas* fueron similares y no hay aparentemente diferencias distinguibles entre los diferentes tipos estudiados (Steele, 1997).

La literatura provee pocas respuestas a muchas preguntas respecto a la estructura molecular del almidón de banano y cómo es la interacción de componentes como amilosa, amilopectina, lípidos y proteínas para conferir la estructura tridimensional al gránulo y otorgarle sus propiedades, de tal forma que con el entendimiento de la estructura molecular y composición del almidón de banano sus propiedades sean optimizadas. Además, un uso industrial exitoso de los bananos cosechados podría aliviar problemas relacionados con el empleo y finanzas de diferentes comunidades, teniendo como una aplicación práctica el uso de la pulpa en la producción de almidón o de harinas de bajo costo. Se indica que el almidón de banano tiene potencial como producto de consumo por sus propiedades específicas a nivel funcional y digestivo, así como bajos costos de producción (Zhang *et al.*, 2005).

Debido a la alta concentración de almidón, el procesamiento del plátano verde como harina y almidón es de importancia en la producción de alimentos. El estudio del almidón como factor relevante para la salud humana ha aumentado, al reconocerse que en el reino vegetal el fruto del plátano verde contiene una fracción denominada almidón resistente, no degradable por las enzimas digestivas del hombre. Investigaciones han mostrado que el almidón resistente disminuye la curva postprandial y el índice glucémico (Pacheco-Delahaye y Testa, 2005).

Adicionalmente, las propiedades funcionales de almidones y harinas de musáceas han sido caracterizados sin considerar o establecer alguna relación entre el modo de consumo y los genotipos (Zhan *et al.*, 2005). Con base en lo anterior Dufour^c *et al.*, 2009, buscaron establecer la relación entre las propiedades térmicas y funcionales con genotipos y modos de consumo, por lo que considerando la revisión bibliográfica efectuada por ellos, la mayoría están relacionados con bananos tipo postre, principalmente del grupo Cavendish, encontrando que los contenidos de almidón en la pulpa reportados en la literatura varía en el rango de 61 – 82% y los contenidos de amilosa varían dependiendo los métodos y equipos usados, reportando valores desde 8,6% hasta 38,3%. Así, es difícil establecer una relación entre los contenidos de amilosa, grupos genómicos y

modos de consumo. En este estudio se demostró una clara relación entre el modo de consumo y los contenidos de amilosa, al parecer el contenido de amilosa es un criterio de calidad relevante para usarse en futuros modelos estratégicos para la proyección y discriminación en los hábitos de consumo de nuevas variedades. Los plátanos exhiben más altos contenidos de amilosa que los bananos y requieren temperaturas mayores para hidratación (temperaturas de formación de pasta y gelatinización). Las variedades Hartón, Dominico Hartón, Dominico, Cachaco, Cubano Blanco y clones de Pelipita con contenidos promedio de amilosa entre 23,2 y 24,9%, fueron mencionadas en un sondeo con consumidores, como las variedades más difíciles de cocinar en agua manteniendo la misma tendencia de endurecimiento después de 24 horas en almacenamiento en refrigeración, fenómeno que podría explicarse por retrogradación del almidón.

2.2.4.2 Propiedades reológicas en musáceas

En el caso particular del efecto de la cocción sobre la textura de *Musas*, se tiene el estudio efectuado por Qi *et al.*, en el año 2000, donde se encontró que pulpa cruda de plátano variedad Big Ebanga resultó ser 33% más dura que la pulpa cruda de banano variedad Cavendish, como se muestra en la figura 18:

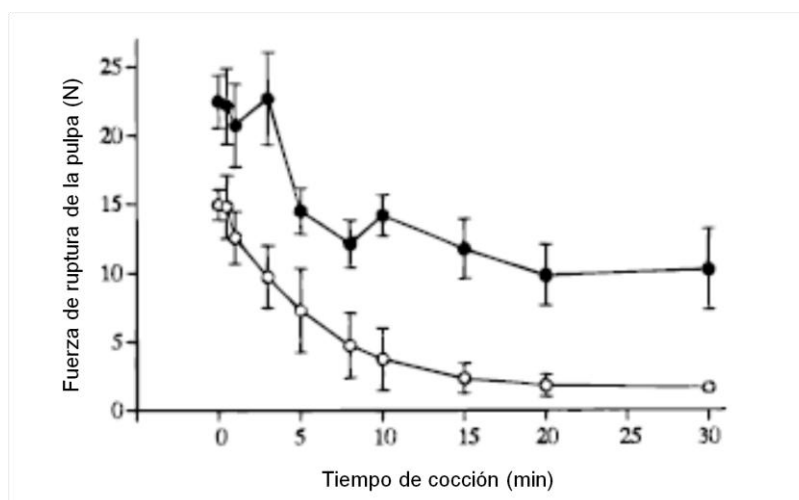


Figura 18. Cambios en la fuerza de ruptura de pulpas crudas de banano (Cavendish) y plátano (Big Ebanga) durante cocción a 100°C. Las barras de error muestran una desviación estándar sobre la media (media \pm SD, n = 12). N = Newton. \circ Banano, \bullet Plátano

Fuente: Qi *et al.*, 200

La firmeza de la pulpa del banano disminuyó claramente durante los primeros 10 minutos de cocción, perdiendo el 75% de su firmeza original comparada con la pérdida del 37% de la firmeza original del plátano. Los pequeños cambios en la firmeza tomaron lugar para cada tipo de fruto después de 10 minutos adicionales de cocción. Así la pulpa del plátano se ablandó a una menor velocidad que la del banano y se mantuvo firme durante la cocción. Hubo una relación lineal negativa inversa entre la fuerza necesaria para penetrar el interior del tejido de la pulpa (firmeza) de la *Musa* cocida y el tiempo de cocción en los primeros 10 minutos de cocción a 100°C. Los coeficientes de correlación entre el tiempo de cocción y la fuerza de ruptura de la pulpa en los primeros 10 minutos de cocción fueron -0,98 ($r^2 = 0,95$) y -0,88 ($r^2 = 0,78$) para el banano y el plátano respectivamente. La menor correlación se encontró después de los 10 minutos de cocción.

Los resultados indicaron, que hay una diferencia significativa entre los diferentes genotipos de *Musa* en sus cambios estructurales antes y durante la cocción. El tiempo de cocción tuvo una gran

influencia sobre la textura cocida de las *Musas*, sin embargo, las cinéticas de cocción fueron diferentes antes y después de los 10 minutos del proceso; un hallazgo similar fue también reportado con papas cocidas. Qi *et al.*, 2000, citan en su estudio a Huang y Bourne (1983) quienes postularon que hay dos mecanismos simultáneos de cinética de primer orden involucrados en el ablandamiento de vegetales al inicio y en cocción prolongada. El mecanismo uno, probablemente es debido a cambios en la pectina en la capa de lamela media y responsable de aproximadamente el 95 – 97% de la firmeza del producto crudo y el mantenimiento de la firmeza es dado por el mecanismo dos, en el cual la naturaleza bioquímica es desconocida.

Al someter el banano a diferentes temperaturas de cocción, se encontró que el calentamiento entre 60 – 70°C por 10 minutos tuvo un pequeño efecto sobre la firmeza de la pulpa comparado con el calentamiento entre 80 – 100°C, pues la fuerza de ruptura de la pulpa del banano disminuyó significativamente, alrededor del 29%, solamente cuando la temperatura alcanzó al menos 80°C. La cocción a 90°C causó un 36% de pérdida de firmeza y a 100°C en agua, resultó en una textura suave para la pulpa, con una disminución de la firmeza de un 77% hacia el final del tratamiento de cocción. Este fenómeno también observado en papas, podría deberse a la retención de actividad de la pectinmetilesterasa (PME) en temperaturas de cocción por debajo de 70°C. La PME tiene la habilidad de esterificar la pectina metilada en los grupos carboxilo libres, los cuales son resistentes a la degradación por calentamiento. Los resultados obtenidos en este estudio indican que la temperatura de cocción influye en la textura final del tejido de la fruta cocida (Qi *et al.*, 2000).

Durante la cocción, el almidón de la pulpa del banano como la del plátano se mantiene constante. Podría esperarse que el contenido más alto de almidón para el plátano produjera más presión de hinchamiento que el del banano, el cual en cambio, conduciría a una textura más suave. Aunque la relación entre el contenido de almidón y la firmeza fue encontrada con papa, otros trabajos sobre papa han mostrado que más almidón (y amilosa) está asociado con tejidos firmes, sugiriéndose que la cadena de amilosa podría actuar como cemento entre las células de la papa para la formación de puentes de hidrógeno con polisacáridos de las paredes celulares. Los cambios en el contenido de almidón no son atribuibles a las variaciones en la textura del banano cocido y el tejido de la pulpa de plátano, esto es un resultado similar al encontrado por otros investigadores con papas (Qi *et al.*, 2000). El tejido de la pulpa durante la cocción fue observado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por su sigla en inglés), encontrando en las muestras crudas de banano y plátano que las paredes celulares estuvieron lisas, e igualmente los gránulos de almidón no se fundieron, como se muestra en la figura 19:

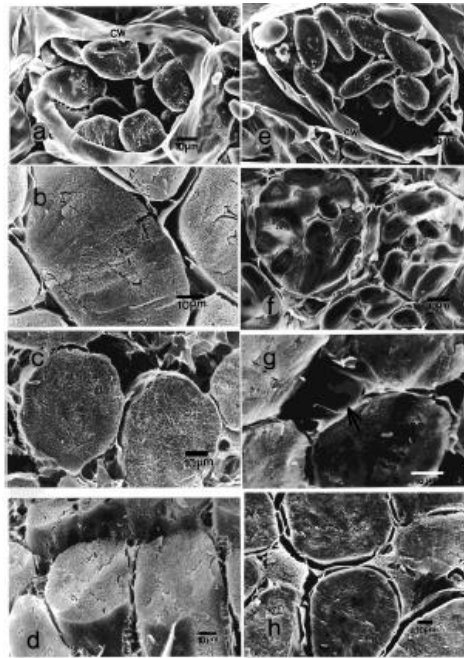


Figura 19. Microgramas SEM del tejido del parénquima de la pulpa para banano (Cavendish) (a – d) y plátano (Big Ebanga) (e – h) durante la cocción. a) Banano crudo; (b) banano con 2 min de cocción; (c) banano con 3 min de cocción; (d) banano con 8 min de cocción; (e) plátano crudo; (f) plátano con 2 min de cocción; (g) plátano con 3 min de cocción; (h) plátano con 8 min de cocción. Flechas en (b) y (g) indican expansión del espacio intercelular y la flecha en (c) indica materiales intercelulares. CW) pared celular; G) gel de almidón; CW) separación de la pared celular.
Fuente: Qi *et al.*, 2000

La forma del gránulo de almidón del plátano pareció ser más redonda y elongada que los gránulos de almidón del banano, los cuales fueron más tipo plato. Para el tejido del banano calentado, los gránulos de almidón perdieron su definición distintiva y se fundieron dentro de una estructura reticular uniforme (b). Sin embargo, en el plátano, solamente la gelatinización toma lugar después del mismo período de calentamiento (f). Luego de 3 minutos de cocción, el almidón en el banano y en el plátano ha desarrollado una apariencia reticular con expansión del espacio intercelular; no obstante, se observó acumulación de material intercelular solamente en el banano (flecha en c). Hubo muy poca diferencia entre la apariencia de sus microestructuras en el banano y el plátano después de los 20 minutos de cocción (d y h). Se ha sugerido que la expansión del espacio intercelular en el tejido de papa cocida, indica disolución de la lamela media y separación de la pared celular. Los materiales reticulados presentes en el espacio intercelular podrían señalar daños en la pared celular de ahí el agrietamiento de la pared debido al calentamiento (Qi *et al.*, 2000).

En conclusión, hubo dos fases de pérdida de firmeza de los tejidos de las pulpas del banano y el plátano durante la cocción, la primera, también la más rápida, ocurrió entre los primeros 10 minutos y más de la mitad de la firmeza original se perdió durante este período. La segunda, una fase mucho más lenta de pérdida de firmeza continuó por más de 10 – 15 minutos. Los plátanos fueron mucho más firmes después de los mismos períodos de cocción que los bananos. Los contenidos de almidón y amilosa fueron mucho más altos relacionados con la dureza del plátano (Big Ebanga) y la suavidad del banano, el cual contiene 30% más pectina que el plátano. Las observaciones en el SEM revelaron que la disolución de la lamela media y las separaciones de la pared celular correspondieron a la pérdida de firmeza durante las primeras etapas de cocción. El hinchamiento y

gelatinización del almidón contribuyeron a una pérdida adicional de firmeza. Tanto la separación de la pared celular y el hinchamiento del almidón resultaron en una textura para consumo muy suave en banano y plátano. Una temperatura inferior a 70°C solamente tuvo un pequeño efecto sobre la pérdida de firmeza térmica en el banano, además, cuando se realizan cocciones empleando sales como el CaCl_2 , una solución al 0,5% resulta en una textura mucho más firme y menor ganancia de agua, tanto en banano como en plátano, que por cocción sólo en agua o en soluciones con otros solutos como EDTA al 0,5% y NaCl. Esto fue particularmente obvio en el banano comparado con el plátano (Qi *et al.*, 2000).

Por otro lado Gibert *et al.*, 2009 realizaron una evaluación de textura para la caracterización del ablandamiento de pulpa de 15 variedades de plátano y banano procedentes de Colombia, durante el proceso de cocción en agua en ebullición. El análisis se efectuó mediante el método de conversión fraccional y se establecieron grandes diferencias en el comportamiento a la cocción entre variedades y genotipos, encontrando distintas velocidades de ablandamiento y variaciones en las firmezas relativas en equilibrio. Los valores de las firmezas relativas fueron definidos por la relación entre la firmeza hallada en el tiempo t de cocción, con respecto a la firmeza del material crudo.

Las mayores pérdidas encontradas de la firmeza relativa correspondieron a los genotipos FHIA 20 y FHIA 18, luego de dos horas de cocción y Guineo, luego de cocerse durante 98 minutos. Igualmente fue estudiado el fenómeno de gelatinización del almidón mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y con las harinas obtenidas del material cocido, se realizaron perfiles de viscosidad utilizando un analizador rápido de viscosidad (RVA), con base en esta segunda prueba se establecieron los valores de las pendientes de las viscosidades máximas, las que fueron comparadas con la información obtenida de los análisis de textura y del grado de gelatinización del almidón (Gibert *et al.*, 2009).

Con base en los resultados obtenidos puede destacarse que independiente a la absorción de agua, los primeros 15 minutos de cocción demostraron una fuerte contribución del proceso de gelatinización al ablandamiento térmico; y fue determinado que con 30 minutos de cocción la evaluación de la firmeza parece ser suficiente para la identificación del comportamiento del genotipo y por lo tanto para la predicción de las preferencias de los consumidores.

Con este estudio se hizo un significativo progreso en el conocimiento de las características texturales de *Musas* y de sus cinéticas de pérdida de firmeza durante tratamiento térmico en exceso de agua, así mismo, con el empleo de la técnica de conversión fraccional se obtuvo un modelo de primer orden con un buen ajuste del perfil de ablandamiento experimental para varios cultivares de musáceas. Se evidenció que la evolución de la textura durante la ebullición está relacionada con el grado de gelatinización de los gránulos de almidón, particularmente en los primeros 15 minutos de cocción y no parecería ser conducida por la ganancia de agua. Sin embargo, se observó una relación significativa entre la firmeza y la materia seca de los cultivares crudos (Gibert *et al.*, 2009).

Otros estudios reológicos en musáceas realizados en Colombia son:

- Banano (Cavendish Valery): Cuyas muestras (bananos enteros con cáscara) fueron sometidas a cargas de compresión unidireccional usando texturómetro. A partir de la gráfica fuerza - distancia (deformación), se obtuvo la fuerza máxima requerida para penetrar la cáscara del banano y la fuerza media requerida para penetrar posteriormente la pulpa. Igualmente se determinó el Módulo elástico (Módulo de Young) a partir de ensayos de compresión y de flexión en 3 puntos hasta su fractura. Debido a la complejidad de la estructura que exhiben los productos de naturaleza biológica, el análisis del módulo elástico a compresión se realizó a 4 niveles de deformación de 17, 34, 50 y 100 %. Las fuerzas de fractura del banano se realizaron en su estado natural (elemento) tanto a compresión como a flexión (Ciro^b *et al.*, 2005).

Los resultados de las pruebas de fuerza de fractura a flexión y compresión mostraron que tanto el producto en su estado natural y su pulpa tienen una resistencia mayor a flexión que a compresión. Los modelos estadísticos indicaron que las propiedades mecánicas del producto definidas en firmeza, fractura y módulos elásticos son altamente dependientes del tiempo poscosecha (Ciro^b et al., 2005).

Las conclusiones de este trabajo indican que para la fuerza de firmeza, el punto de penetración influye en la caracterización reológica del producto, donde la firmeza del banano es menor en la zona próxima al extremo distal (parte del fruto donde está sujeto al racimo), debido a que la maduración comienza en este extremo.

El fruto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades mecánicas tales como fuerza de fractura y módulo de elasticidad dependen de la dirección de carga. Las pruebas de fractura del material vegetal, mostraron que la resistencia del banano es más alta bajo ensayos a flexión que a compresión, esto también ocurrió en las pruebas de esfuerzo de falla de la pulpa, lo que indica que la posición longitudinal es la más adecuada para transportar y almacenar el producto.

El banano como material y elemento biológico es de carácter viscoelástico, es decir, su comportamiento mecánico es intermedio entre el de un sólido elástico y un líquido newtoniano altamente dependiente del tiempo (Ciro^b et al., 2005).

✱ Pulpa de plátano verde (Dominico Hartón): A nivel experimental se evaluó bajo compresión unidireccional en diferentes condiciones de carga (longitudinal y transversal), algunas propiedades reológicas y las curvas de flujo de la pulpa de plátano. Los ensayos fueron realizados a velocidad de deformación, temperatura y humedad relativa constantes. Con base en las pruebas efectuadas se encontró que el producto bajo cargas compresivas posee más resistencia a la falla en dirección longitudinal que transversal, indicando una alta presencia anisotrópica. Además, el punto central del producto adquiere relevancia para efectos de transporte, empaque y manejo a nivel poscosecha debido a su menor resistencia (Ciro^a et al., 2008).

✱ Finalmente, en pruebas preliminares, frutos verdes de quince variedades de musáceas cultivadas en Colombia se estudiaron en un proceso de cocción con agua en ebullición. Se estableció un protocolo para estudiar el cambio en la textura de los frutos en el proceso, considerando los siguientes aspectos:

Materia prima: Plátanos de cocción: Hartón, Dominico Hartón, Dominico (Quindío), Dominico (Cauca), África, Maqueño, Guayabo, Popocho y FHIA 20. Guineo (banano de cocción). Por razones de comparación se incluyeron también Bananos de postre: Rollizo, Cavendish, FHIA 1, FHIA 18 y Tafetán.

Procedimiento de Cocción: Se utilizó como medio de calentamiento agua a temperatura de ebullición (96°C, a 1050 m.s.n.m); frutos en trozos cilíndricos pelados de 4,5 cm de longitud; una relación másica agua / fruto 6 a 1 y un tiempo de cocción 2 horas.

Equipo de medición: El equipo empleado fue un Texturómetro TAXT2 con celda de fuerza de 5 kg, con accesorio en forma de cono (ángulo de 40°). Operado a una velocidad de aproximación de 2 mm/s y una velocidad de medición de 0,5 mm/s, para un tiempo de penetración de 30 segundos.

Condiciones de experimentación: Para cada uno de los tiempos de cocción de las respectivas variedades se calculó el coeficiente de variación del trabajo y se relacionó con el tiempo de penetración del cono, que estuvo comprendido entre 0,25 y 30 s o su equivalente en distancia de 0,125 a 15 mm.

Buscando establecer la relación entre los coeficientes de variación y el tiempo de penetración, se determinaron los promedios de los coeficientes de variación que son los valores señalados en el eje y de la figura 20. Cada punto representó un promedio de los coeficientes de variación observados durante el proceso de cocción a una determinada profundidad.

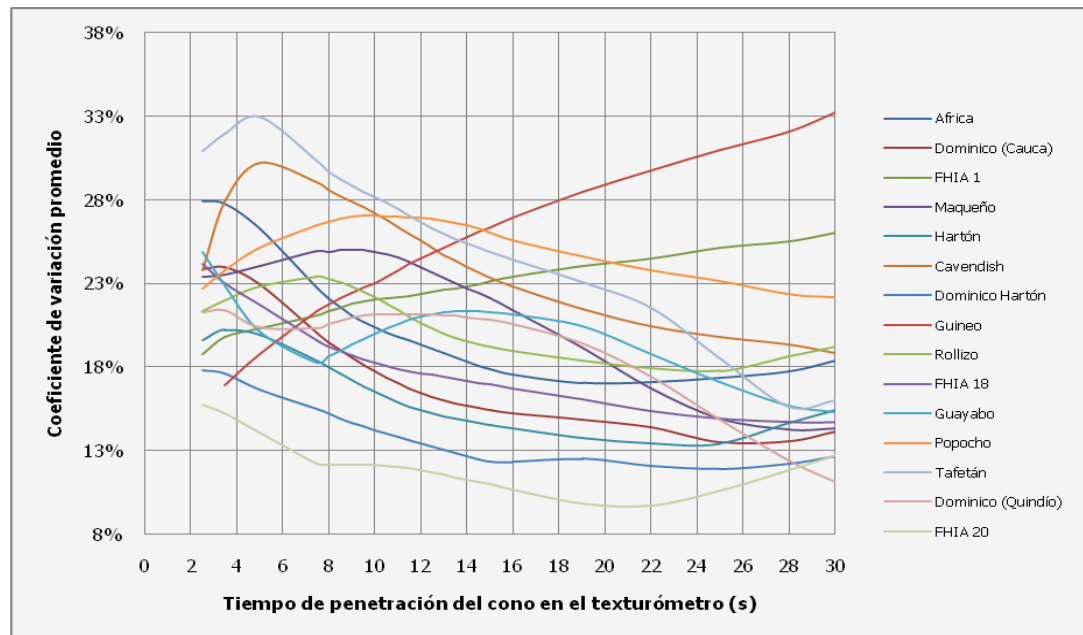


Figura 20. Coeficiente de variación del trabajo de penetración en el análisis de textura durante los estudios de cocción en agua de musáceas colombianas

Fuente: Álvarez *et al.*, 2008

Con el propósito de desarrollar una prueba aplicable a todos los frutos de musáceas, se eligió la zona entre 8 y 12 segundos de penetración como la óptima. Seleccionando 10 segundos, que corresponden a 5 mm de penetración, como el tiempo o la profundidad a la cual se tomaron los valores del trabajo, para evaluar el cambio de la textura de los trozos cocidos.

El cambio en la textura puede apreciarse en la figura 21, como la variación del trabajo de penetración del accesorio para punción de las muestras (cono) instalado en el texturómetro. Para todos los frutos estudiados la firmeza disminuyó rápidamente en los primeros 30 minutos del tratamiento de cocción y posterior a éste desde el minuto 50 aproximadamente, hubo mayor estabilidad hasta los 120 minutos de cocción, como se muestra en la figura 21.

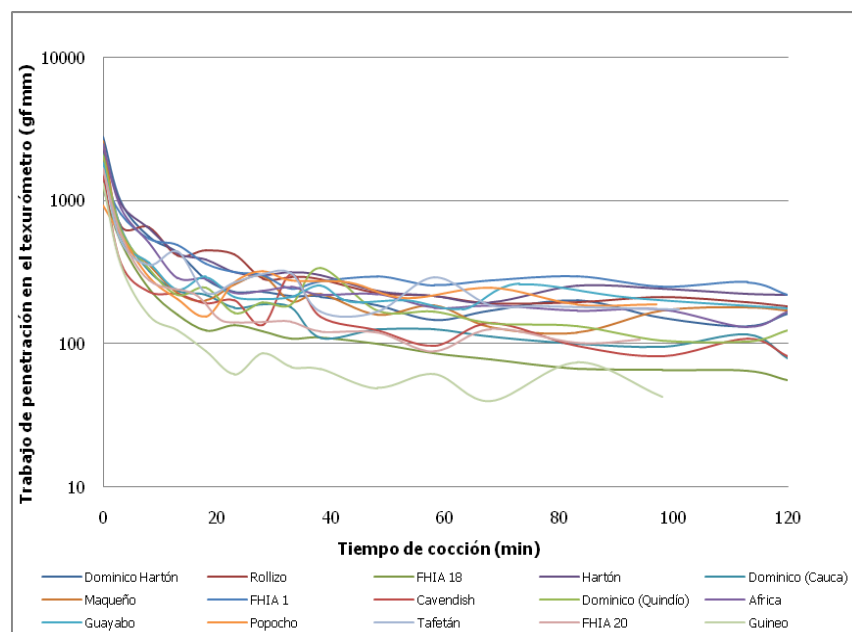


Figura 21. Modificación de la firmeza durante la cocción en agua de musáceas colombianas
Fuente: Álvarez *et al.*, 2008

La firmeza de los productos crudos se clasificó de mayor a menor como se muestra en la figura 22. Se puede apreciar que los plátanos de cocción son más firmes cuando se comparan con los bananos, con aproximadamente el doble en los valores del trabajo de penetración.

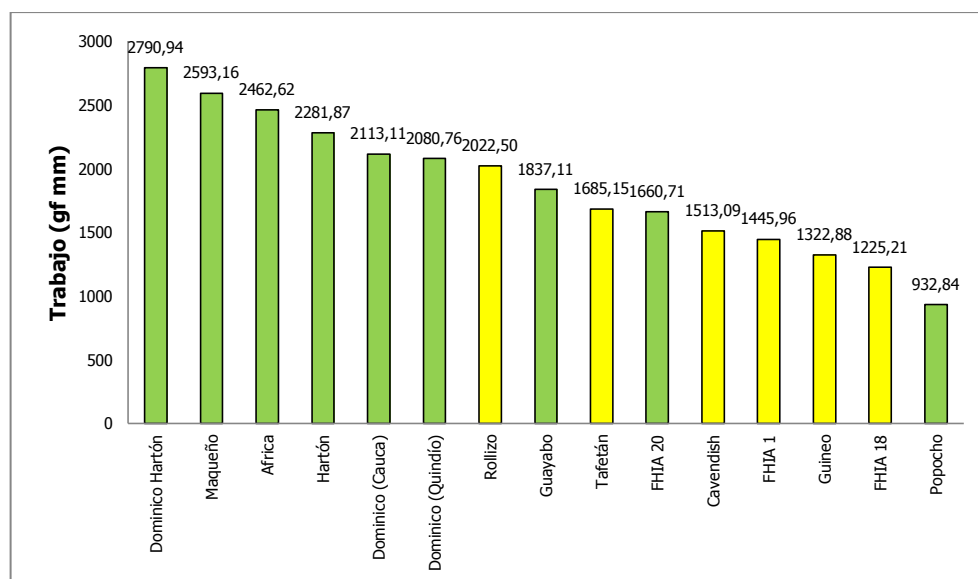


Figura 22. Firmeza de la pulpa cruda de musáceas colombianas. (Barras verdes: plátanos, barras amarillas: bananos)

Fuente: Álvarez *et al.*, 2008

Con base en lo que puede observarse en la figura 23, la cocción provoca un ablandamiento del tejido celular, con valores del trabajo menores para los trozos cocidos comparados con los crudos, tendiendo los bananos a mantenerse igualmente menos firmes.

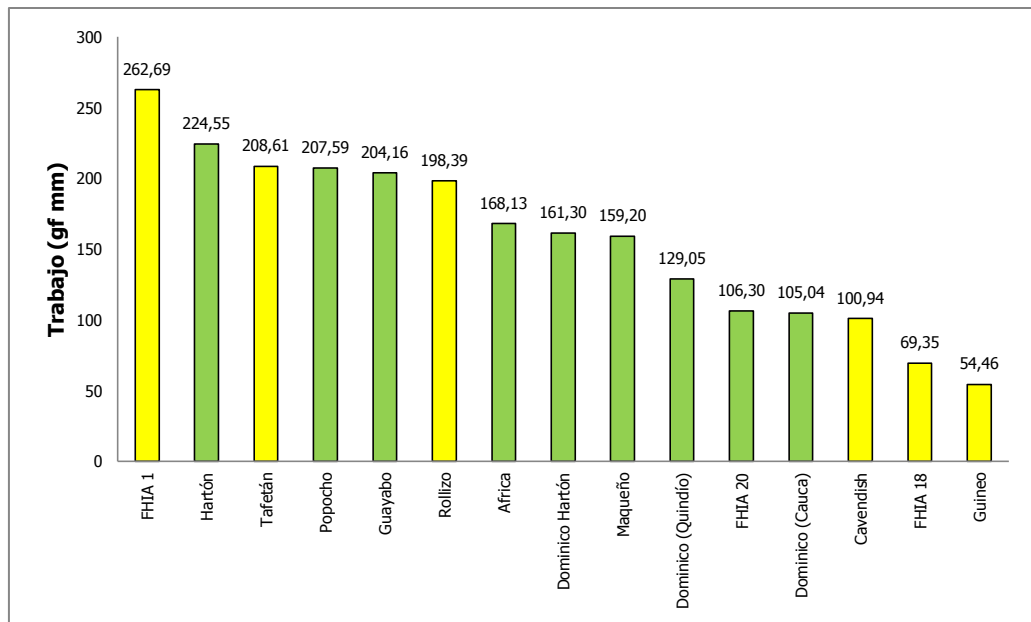


Figura 23. Firmeza de trozos de frutos de musáceas colombianas después de la cocción en agua por 120 minutos. (Barras verdes: plátanos, barras amarillas: bananos)

Fuente: Álvarez *et al.*, 2008

Con el fin de apreciar mejor las características de cocción, se definió el factor de disminución de la firmeza (relación entre la fuerza de penetración del producto crudo y la fuerza de penetración del producto cocinado); a partir de este parámetro se pueden identificar los frutos de musáceas que cuentan con mejores condiciones para la cocción, ya que los valores más altos representan variedades con textura más blanda cuando están cocidas.

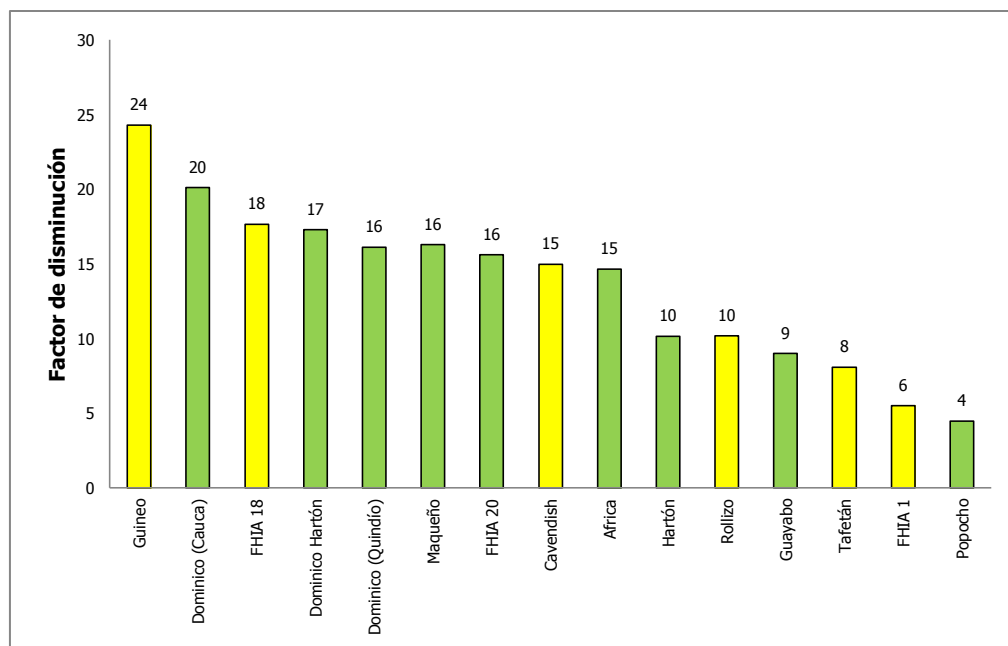


Figura 24. Factor de disminución de la firmeza después de la cocción. (Barras verdes: plátanos, barras amarillas: bananos)

Fuente: Álvarez *et al.*, 2008

De acuerdo con los resultados obtenidos, el Guineo y el Dominico (Cauca) tienen los valores del factor de disminución de firmeza más altos, corroborando el uso del Guineo y el Dominico como populares en Colombia en la preparación de productos alimenticios autóctonos que emplean la cocción en agua.

Por último, se observó una amplia variabilidad en la firmeza entre los frutos de las musáceas estudiadas, tanto entre los frutos crudos como en los tratados por cocción. Al analizar el factor de disminución de firmeza, fue posible identificar las variedades de plátano más adecuadas para la cocción en agua (Dominico, Dominico Hartón y Maqueño). Así mismo, con las pruebas efectuadas se establece un protocolo de evaluación de textura que permite establecer diferencias entre variedades en el proceso de cocción en agua (Álvarez *et al.*, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIAS PRIMAS

Se trabajó con los cultivares Hartón (AAB, subgrupo plantain) y Guayabo (AAB, subgrupo Popoulu/Maia maoli), compradas a un mismo proveedor de una de las plazas de mercado de la ciudad de Cali (Colombia). La selección de los materiales se hizo considerando que ambos cultivares son de uso industrial en Colombia y presentan buenas posibilidades de aprovechamiento en procesos de transformación alimentaria. Una característica de interés para su empleo como materias primas, es que la proporción de cáscara es inferior al 39%, Hartón con 37,8% y Guayabo con 36,6% (Dufuor *et al.*, 2008), aspecto que permite mejores rendimientos en producción.

Para las condiciones de selección de los cultivares, se consideró que presentaran diferencias en sus valores de materia seca y contenido de amilosa, para el establecimiento de diferencias y la posible incidencia de estos parámetros en los resultados obtenidos.

Los cultivares seleccionados estuvieron en estado de madurez verde, con una concentración de solubles en el extracto líquido del fruto menor de 9 °Brix y se buscó que su procesamiento se hiciera en el menor tiempo posible a su adquisición. Adicionalmente, a los cultivares crudos escogidos se les determinaron los siguientes parámetros:

- Materia seca: Se estableció con base en AOAC 925.10.
- Contenido de almidón, de acuerdo con la metodología para almidón total propuesta por Goñi *et al.*, 1997 (Anexo 2).
- Contenido de amilosa. Esta determinación se hizo sobre el almidón aislado de cada uno de los cultivares, de acuerdo con el método indicado por Bello *et al.*, 1999. El contenido de amilosa fue determinado en las muestras de almidón obtenidas, con base en la metodología propuesta por Ceballos *et al.*, 2008, en la que se realiza:
 - * Dispersión de los gránulos de almidón en etanol y gelatinización con hidróxido de sodio.
 - * Neutralización de alícuota con ácido y tratamiento de la solución con yodo, para generación de una coloración azul oscura.
 - * Medición por espectrofotometría de la intensidad del color, la cual está relacionada con el contenido de amilosa.
 - * Comparación con curva estándar usando amilosa y amilopectina extraídas de papa.

3.2 FASE EXPERIMENTAL I. PROCESOS DE COCCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

3.2.1 Condiciones de experimentación en la cocción

Los tratamientos de cocción se realizaron en el laboratorio de operaciones unitarias de tecnología e ingeniería de alimentos de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Se realizaron dos métodos de cocción, en agua y en vapor. La cocción en agua se hizo a presión atmosférica de la ciudad de Cali (670 mm Hg) y a tres temperaturas. El vapor estaba a 10 psig. Para el estudio de la firmeza en la cocción el diseño experimental planteado fue de tipo factorial 2x4x15, en donde:

- Factor 1: *Cultivar de plátano*, con dos niveles, Hartón y Guayabo.
- Factor 2: *Tratamiento de cocción*, con cuatro niveles, establecidos de la siguiente manera:
 - ✓ Tratamiento 1 (T₁): Cocción en agua a 76°C.

- ✓ Tratamiento 2 (T_2): Cocción en agua a 86°C.
 - ✓ Tratamiento 3 (T_3): Cocción en agua en ebullición, que correspondió a 96°C para la presión atmosférica de la ciudad de Cali.
 - ✓ Tratamiento 4 (T_4): Cocción con vapor (Presión de vapor manométrica de 10 psi y temperatura del vapor de 115,3°C).
- Factor 3: *Tiempo de cocción*, con 15 niveles, correspondientes a 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 35, 40, 45, 50 y 60 minutos.

Mediante el software Matlab® versión R2012a, se realizó el análisis de varianza de los datos obtenidos de evaluación de la firmeza a partir del diseño experimental planteado. Cada uno de los tratamientos fue realizado por triplicado.

El protocolo de experimentación estuvo basado en ensayos previos de Álvarez, *et al.*, 2008, procesando frutos sin cáscara y divididos en trozos en forma cilíndrica con longitud de 4,5 cm, cuyas dimensiones se muestran en la figura 25.

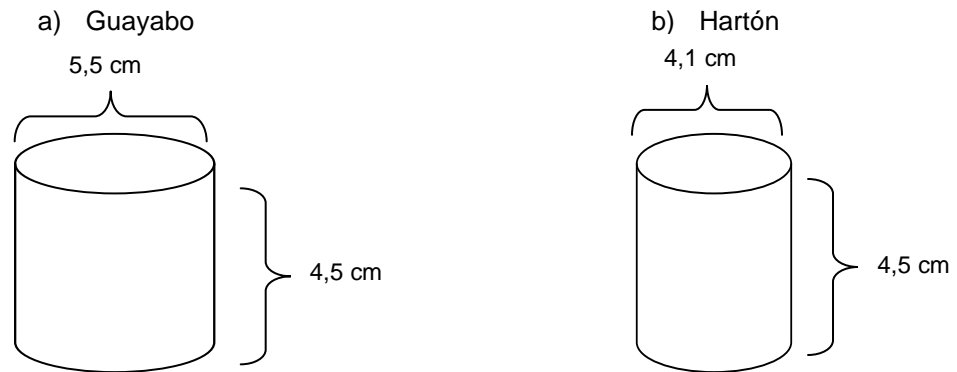


Figura 25. Dimensiones de los trozos de Guayabo y Hartón empleados en los procesos de cocción

Experimentalmente la cocción en agua se realizó en recipientes metálicos, considerando una relación másica agua/plátano de 6:1, con base en las siguientes etapas:

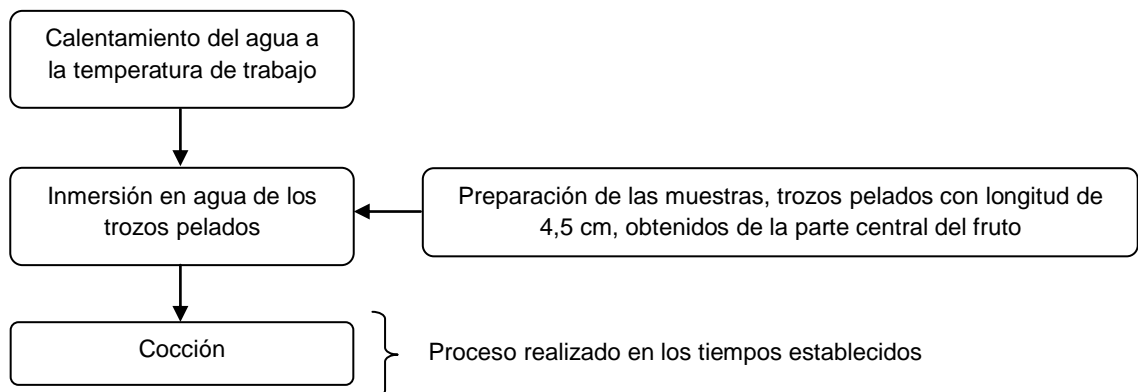


Figura 26. Pasos experimentales para la cocción en agua de musáceas verdes

Las cocciones en agua donde se emplearon temperaturas de 76 y 86°C, fueron llevadas a cabo en un baño termostático (Julabo TW8, Alemania). Para la cocción con agua a 96°C (en ebullición), se utilizaron planchas de calentamiento y en todos los casos se mantuvo el volumen de agua constante, para conservar la relación másica con las muestras.

En cuanto a la cocción con vapor, ésta se realizó en un escaldador (CEV 3/91, Colcocinas Medellín, Colombia), considerando las siguientes etapas:

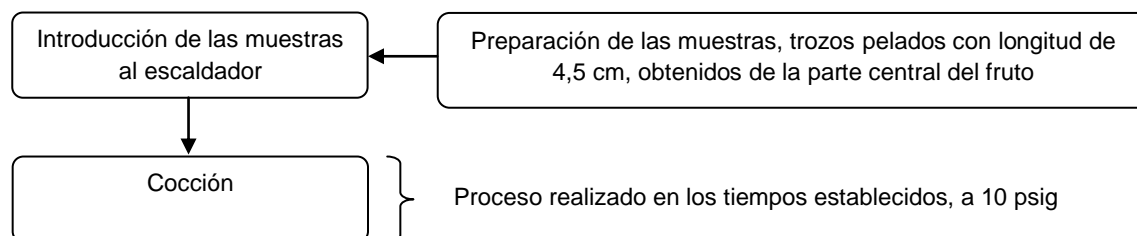


Figura 27. Pasos experimentales para la cocción en vapor de musáceas verdes

3.2.2 Evaluación de la firmeza en los trozos cilíndricos cocidos

La evaluación de la firmeza, establecida como el valor de la fuerza máxima (N) obtenida hasta una penetración en la muestra de 15 mm, se efectuó en los trozos crudos y en los cocidos en todos los tiempos de cocción. Se utilizó el equipo EZ-Test (Shimadzu, Japón), con una celda de carga de 500 N y como metodología, se aplicó test de punción, así:

- Utilización de dispositivo de punción en forma cónica (ángulo de 40°), el cual fue definido por las pruebas preliminares efectuadas.
- Empleo de muestras cilíndricas retiradas del agua de cocción o del vapor y se punzaron en un tiempo no superior a 20 minutos después de extraídas, para evitar el endurecimiento por enfriamiento, para esto las muestras fueron envueltas en papel de aluminio y conservadas en desecador hasta su análisis.
- Se consideraron como condiciones de la prueba, una velocidad inicial de desplazamiento del dispositivo de punción de 50mm/min hasta el contacto con la muestra, velocidad de penetración de 30mm/min y longitud de penetración de 15 mm.
- Ubicación de la muestra cilíndrica sobre la plataforma del texturómetro en forma vertical, es decir, teniendo como área de contacto la sección transversal del trozo y dirigiendo el cono hacia su centro.

Con base en los valores de firmeza obtenidos para cada una de las muestras en los 15 tiempos de cocción establecidos, se realizó un análisis de cinética de la firmeza durante el proceso de cocción, causada por el ablandamiento del tejido vegetal, la cual se puede considerar de primer orden, de acuerdo con:

$$\ln \left(\frac{TP_t}{TP_0} \right) = -kt \quad \text{Ecuación 11 (Gibert *et al.*, 2010, Nisha *et al.*, 2006)}$$

Donde:

- TP_0 , valor de la firmeza en el tiempo 0.

- TP_t , lectura de la firmeza después del tiempo t .
- k , constante de velocidad para la reacción de primer orden.

De manera alternativa la cinética se puede representar como:

$$\ln(1 - f) = -kt \quad \text{Ecuación 12 (Rizvi y Tong, 1997, Gibert *et al.*, 2010)}$$

En donde f representa la relación:

$$f = \frac{TP_0 - TP_t}{TP_0 - TP_\infty} \quad \text{Ecuación 13 (Rizvi y Tong, 1997, Gibert *et al.*, 2010)}$$

Sea f , la fracción de la pérdida de firmeza $TP_0 - TP_t$ en el tiempo t a la pérdida total de $TP_0 - TP_\infty$ a un tiempo muy prolongado. Gibert *et al.*, 2010 observaron en un estudio en agua en ebullición de diversos cultivares de musáceas, que la ecuación 12 se ajusta mejor para tiempos prolongados de cocción en donde se alcanza un valor final de firmeza de equilibrio TP_∞ .

Reemplazando f en la ecuación 12, ésta puede expresarse como:

$$TP_t = TP_\infty + (TP_0 - TP_\infty)e^{-kt} \quad \text{Ecuación 14}$$

Teniendo en cuenta que los datos de firmeza se manejaron en términos de firmeza relativa, la cual corresponde a la relación $\frac{\text{Firmeza del material cocido en el tiempo } t}{\text{Firmeza del material crudo}}$, (TP_t/TP_0) , la ecuación 14, se dejó indicada así:

$$F_t = F_\infty + (1 - F_\infty)e^{-kt} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde F_t corresponde a la firmeza relativa en el tiempo t de cocción y F_∞ firmeza relativa en equilibrio, en consecuencia, en el presente estudio se utilizó esta ecuación para el análisis de las cinéticas de firmeza en todos los tratamientos de cocción.

Para efectuar los cálculos de los valores de la constante k y de la firmeza relativa en equilibrio para cada tratamiento en ambas variedades se hizo uso del software Matlab 2012^a.

3.2.3 Análisis para estudiar la modificación del almidón en el proceso de cocción

Para el estudio de las modificaciones del almidón por el proceso de cocción fue necesario transformar las muestras crudas y cocidas de los plátanos Hartón y Guayabo en harinas, las que se obtuvieron de acuerdo con lo descrito en la figura 28.



Figura 28. Proceso de obtención de harinas

La molienda de las muestras secas se efectuó en molino de discos, generándose una mezcla entre material grueso y fino, por lo que el tamizado resultó necesario para la clasificación de las harinas. Las harinas utilizadas en los análisis fueron de granulometría fina, correspondientes a un tamaño de partícula inferior a 106 μm y una humedad promedio del 11%.

Los análisis realizados a las harinas procedentes de las muestras de plátano crudo y cocido correspondieron a: análisis térmico (temperaturas y entalpías de gelatinización), análisis de viscosidad durante la formación de pasta en suspensión acuosa, observaciones por microscopía, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH). En el caso de los plátanos cocidos se tuvieron en cuenta para efectuar estos análisis muestras obtenidas de algunos de los tiempos de cocción de los tratamientos.

3.2.3.1 Análisis térmico por calorimetría diferencial del barrido (DSC por sus siglas en inglés)

Estos análisis fueron efectuados en el laboratorio de calidad de yuca del Centro Internacional de Agricultura Tropical -CIAT-, ubicado en la ciudad de Palmira, Colombia. Las muestras utilizadas en esta evaluación correspondieron a aquellas en las que sólo fue posible la detección de la endoterma de gelatinización. Para el análisis por DSC se utilizó un equipo PerkinElmer (Pyris 6, Estados Unidos) y cápsulas de 40 µL de acero inoxidable selladas, se empleó una cápsula con muestra y otra vacía, esta última como referencia. Se prepararon suspensiones acuosas al 20% p/p de las harinas crudas y cocidas empleando agua desionizada, dándoles a cada una de éstas un tiempo de reposo de dos horas. Las muestras se calentaron de 15 a 120°C a una velocidad de 10°C/min. Mediante el software propio del equipo (Pyris), se determinaron: temperatura de inicio de la gelatinización, temperatura en el pico de la endoterma de gelatinización, temperatura de finalización de la gelatinización y entalpía de gelatinización. Los análisis se realizaron por duplicado.

A partir de las entalpías obtenidas por DSC, se determinó el grado de gelatinización (%G), así:

$$\%G = \left[1 - \frac{\Delta H_{\text{Cocido}}}{\Delta H_{\text{Crudo}}} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 16 (Vidal et al., 2007)}$$

En donde:

ΔH_{Crudo} : Entalpía antes del proceso de cocción.

ΔH_{Cocido} : Entalpía posterior a la cocción.

Con base en los resultados obtenidos del grado de gelatinización del almidón en las muestras de las harinas cocidas de Hartón y Guayabo, se estableció la cinética de gelatinización de acuerdo con:

$$\ln (1 - \alpha) = -kt \quad \text{Ecuación 17 (Beleia et al., 2006)}.$$

Donde α corresponde a la fracción de almidón gelatinizado, k es la constante de velocidad (min^{-1}) y t , es el tiempo de cocción. La expresión anterior asume que la gelatinización del almidón es una modificación irreversible representada en una ecuación de primer orden, cuya constante de velocidad es la pendiente negativa de la transformación del almidón nativo a almidón gelatinizado.

El análisis estadístico de la información se hizo mediante el software Matlab® versión R2012a.

3.2.3.2 Análisis de viscosidad durante la formación de pasta en suspensión acuosa

En este caso, sólo se emplearon las harinas obtenidas de los materiales cocidos en los tiempos de 3, 30 y 60 minutos, así como harinas crudas de Hartón y Guayabo, para esto las muestras se prepararon en una suspensión al 8% p/v; utilizando como solvente solución inhibidora de α -amilasa de AgNO_3 al 0,2 mM, con volúmenes de muestra de 25 mL. Las suspensiones se procesaron en un analizador rápido de viscosidad (Rapid Visco™ Analyser-RVA serie 4, Newport Scientific, Sydney, Australia), a 960 rpm durante los primeros 10 segundos y luego a velocidad constante de 160 rpm. La temperatura de inicio para el análisis fue 50°C, se calentó hasta 90°C, a

una velocidad de 6°C/min, y se mantuvo estable a esta temperatura durante 5 min para luego disminuir nuevamente hasta 50°C, también a una velocidad de 6°C/min.

De los resultados obtenidos de las curvas de empastamiento se determinaron los siguientes parámetros:

- **Temperatura de inicio de la gelatinización:** Es la temperatura a la que se inicia el aumento en la viscosidad de la suspensión.
- **Viscosidad máxima:** Es la máxima viscosidad alcanzada por la suspensión después de la cual la viscosidad empieza a descender.
- **Inestabilidad del gel (Breakdown):** Corresponde al pico de viscosidad menos depresión de la viscosidad (viscosidad mínima).
- **Viscosidad mínima:** Viscosidad mínima después del pico que ocurre normalmente alrededor del comienzo del enfriamiento de la muestra.
- **Viscosidad final:** Viscosidad al final de la prueba. También es la habilidad del material para formar una pasta viscosa o gel después de cocción o enfriamiento.
- **Retrogradación (Setback):** Viscosidad final menos depresión de la viscosidad.
- **Facilidad de cocción:** Es el tiempo que transcurre en alcanzar el hinchamiento de todos los gránulos, desde el momento en que éste se inicia. Se calcula restando el tiempo en que alcanza la viscosidad máxima y el tiempo en que alcanza la temperatura de gelatinización; se expresa en minutos (min).

El análisis estadístico de la información se hizo mediante el software Matlab® versión R2012a.

3.2.3.3 Análisis óptico mediante microscopía electrónica de barrido

El propósito de este análisis fue observar el cambio presentado en la morfología de los gránulos de almidón en las harinas obtenidas de trozos cocidos de Hartón y Guayabo, para los cuatro tratamientos en diferentes tiempos de cocción, así como en las harinas de los materiales crudos. De acuerdo con los resultados obtenidos de gelatinización de los almidones en las harinas, se seleccionaron las muestras para la observación.

Las siguientes fueron las harinas utilizadas:

- Tratamiento en agua a 76°C de los tiempos 3, 15 y 30 minutos, así como 45 y 60 minutos solamente para harinas de Hartón.
- Cocción en agua a 86°C, con los tiempos de 3, 9 y 15 minutos.
- Cocción en agua en ebullición, para los tiempos de 3, 9 y 12 minutos.
- Cocción con vapor, para los tiempos 3 y 6 minutos.

Se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido, en la que las muestras fueron depositadas sobre cinta de grafito doble adhesiva formando una capa delgada, fijadas de manera individual en el portamuestras, luego se sometieron a cubrimiento con oro, en un período comprendido de 3 a 5 minutos, posteriormente se ubicaron en el microscopio JEOL® 6490LV®, de alto vacío cuya fuente de electrones es un filamento de tungsteno W y con un rango de aceleración de voltaje desde 0,3 kV hasta 30 KV, en este caso operado a 15kV, para la obtención de las imágenes.

3.2.3.4 Determinación de índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH) en harinas obtenidas de plátanos cocidos

Estas determinaciones se hicieron con base en la metodología citada por Rodríguez *et al.*, 2006, quienes tomaron como referencia a Anderson *et al.*, 1969. Se utilizaron harinas de granulometría fina ($< 106 \mu\text{m}$), se pesaron 1,25 g (b.s) de muestra en una balanza analítica Mettler AE 200, Suiza, se adicionaron 25 ml de agua destilada y se mezcló la suspensión durante 30 min en una plancha de agitación (Corning Stirrer Plate). Se centrifugó a $3000 \times g$ por 15 minutos en una centrífuga (Sigma Laborzentrifugen 2-15, Alemania). El sobrenadante se decantó, y se llevó a estufa a 40°C , durante 24 horas y posterior secado en estufa a 105°C hasta que se evaporara el agua restante. El gel retenido en los tubos se pesó. Los ensayos se realizaron por triplicado y los índices de absorción y solubilidad en agua, así como el poder de hinchamiento, se determinaron de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$\text{IAA} = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\text{ISA (\%)} = \frac{\text{Peso de solubles (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

A partir de las determinaciones anteriores se estableció el poder de hinchamiento (PH), el cual está establecido así:

$$\text{PH} = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)} - \text{Peso de solubles (g)}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Las muestras de harinas cocidas a las que se les evaluaron estas propiedades, correspondieron a las obtenidas en los tiempos de cocción de 3, 15, 30, 45 y 60 minutos. Adicionalmente se hizo esta misma determinación en las harinas crudas de Hartón y Guayabo, utilizando el mismo procedimiento experimental.

3.2 FASE EXPERIMENTAL II. PREPARACIÓN DE MASAS Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS VISCOELÁSTICAS

3.3.1 Elaboración de las masas y condiciones de experimentación

Se estableció un diseño experimental de tipo factorial $2 \times 4 \times 5 \times 2$, donde:

- Factor 1: *Cultivar de plátano*, con dos niveles: Hartón y Guayabo.
- Factor 2: *Tratamiento*, con cuatro niveles: Agua en ebullición (96°C), agua a 86°C , agua a 76°C y vapor ($115,3^\circ\text{C}$).
- Factor 3: *Tiempo de cocción*, con cinco niveles: 3, 15, 30, 45 y 60 minutos.
- Factor 4: *Contenido de humedad en la masa*, con dos niveles: 60% y 70%. Estos contenidos de humedad se definieron considerando que las masas presentaran valores dentro del rango de humedad de los plátanos crudos, buscando asemejar sus características a la de los frutos verdes frescos.

Se trabajó con las harinas obtenidas en la fase experimental I. Las masas se elaboraron a partir de harina reconstituida con agua destilada a temperatura ambiente. Las harinas tenían tamaño de partícula menor a $106 \mu\text{m}$, granulometría definida por pruebas preliminares.

Las masas se elaboraron por triplicado por cada tratamiento con base en las siguientes etapas:

- Obtención de harinas, de acuerdo con proceso descrito en la figura 28.
- Determinación del contenido de humedad de la harina.
- Pesaje de la harina y medición del volumen de agua, requeridos de acuerdo con el contenido de humedad deseado en la masa.
- Mezcla de la harina y el agua, para ello se hizo un montaje a nivel de laboratorio, acondicionando un beaker plástico para contener los materiales y un agitador metálico de hélice redondeada como dispositivo de mezclado mecánico. El proceso de mezcla se realizó durante un tiempo de 1,5 minutos a una velocidad comprendida entre 156 y 160 rpm.
- Luego de la mezcla, se pesaron 0,32 g de material, se amasó y moldeó manualmente en forma esférica por un minuto y se dejó en reposo por dos minutos más. En esta etapa pudo establecerse bajo cuáles condiciones era posible formar masa, ya que durante la manipulación muchas muestras se desintegraron quedando inservibles para el análisis de viscoelasticidad.

3.3.2 Pruebas de viscoelasticidad de las masas

Las pruebas se llevaron a cabo en reómetro (Bohlin CVO-100, Malvern, Reino Unido) y se aplicó un análisis reológico dinámico, método no destructivo debido a que emplea pequeñas deformaciones sobre el material en estudio. El análisis aplica una deformación oscilatoria sinusoidal sobre la muestra. La respuesta dinámica es un esfuerzo sinusoidal, que tiene un ángulo de fase con la deformación. Para un material completamente elástico la deformación y el esfuerzo están en fase, es decir, el ángulo de fase es igual a cero; mientras que el ángulo es de 90° para un material completamente líquido viscoso (Ruales *et al.*, 2000).

Para realizar las pruebas oscilatorias la muestra moldeada en forma esférica se colocó sobre la base del reómetro, se comprimió utilizando un plato plano liso de 20 mm de diámetro hasta obtener una separación entre el disco y la base de 1 mm. Después de la compresión el exceso de material en el borde del disco se retiró, cubriendo el borde con aceite mineral para evitar la deshidratación de la masa comprimida.

Inicialmente a los materiales experimentales se les hizo una prueba para determinar la zona de viscoelasticidad lineal, definida como la zona donde la deformación es medida en proporción directa al esfuerzo aplicado (Abd *et al.*, 2000), para esto se sometieron las muestras a barridos de deformación, con frecuencia constante y de esta forma se determinó un valor de deformación con el que se conservara estructuralmente el material, para este caso fue de 0,04%, posteriormente se hizo un barrido de frecuencia, con temperatura y deformación constantes, tomando como referencia un rango comprendido entre 1 y 5 Hz; valores dentro de los que el material mantiene su estabilidad. Los parámetros obtenidos de las mediciones oscilatorias fueron: G' (módulo de almacenamiento o elástico), G'' (módulo de pérdida o viscoso) y ángulo de fase (δ) (Angioloni y Collar, 2009).

El comportamiento reológico se explicó con base en:

$$G' \text{ o } G'' = A(\omega)^b \quad \text{Ecuación 21 (Ahmed y Ramaswamy, 2007; López *et al.*, 2009).}$$

Expresión establecida a partir de la ley de potencia y se aplicó tanto para el módulo de almacenamiento como para el de pérdida, siendo ω la frecuencia y A y b constantes o parámetros del modelo.

Así mismo el comportamiento dinámico pudo explicarse con base en el módulo complejo, el cual relaciona:

Módulo complejo (G^*) = $\sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$ Ecuación 22 (Rodríguez^a *et al.*, 2005).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS

Al determinar los valores de materia seca en los frutos de Hartón y Guayabo éstos correspondieron a $39,76\% \pm 1,48$ y $37,53\% \pm 2,76$ respectivamente, de acuerdo con datos reportados en la literatura, la materia seca en el Hartón es $40,70\%$ y en Guayabo $35,10\%$ (Dufuor *et al.*, 2008), evidenciando en la información teórica y experimental que el Hartón presenta un mayor contenido en sólidos totales que el Guayabo.

Con respecto al contenido de almidón total expresado en base seca, se encontró que el Hartón presenta $84,99\% \pm 1,70$ y el Guayabo $82,00\% \pm 2,56$, valores con similitud a los reportados por autores como Gibert *et al.*, 2009, quienes encontraron en el Hartón $85,20\% \pm 1,70$ y en Guayabo $83,70\% \pm 2,90$. Zhang *et al.*, 2005, indicaron que el contenido promedio de almidón en plátanos verdes está entre 70 a 80% en el preclimaterio (antes de la ruptura del almidón) y menos del 1% al finalizar el período climatérico, Zamudio *et al.*, 2010 hacen mención de un contenido de almidón total para plátano macho inmaduro (nombre común del plátano en México) de $91,20\% \pm 1,20$, así mismo se reporta un contenido de $82,34\% \pm 1,36$ en almidón nativo de plátano (Carlos, 2010) y en banano verde se han reportado porcentajes de $74,94 \pm 4,32$ (González y Pacheco-Delahaye, 2006) y $73,80 \pm 3,5$ (Tribess *et al.*, 2009), las diferencias en el contenido de almidón están dadas por los cultivares de musáceas (plátano o banano), condiciones agroecológicas de producción y estado de maduración. Con relación a otros productos, el contenido de almidón de los plátanos estudiados es menor al presente en materias primas como el maíz con $89,28\% \pm 1,82$, papa con $89,44\% \pm 0,64$ y yuca con $90,99\% \pm 0,67$ (Sangeetha, 2006).

En cuanto al contenido de amilosa, se obtuvo para el Hartón $29,26\% \pm 1,25$ y para el Guayabo $26,53\% \pm 0,16$, con relación al reporte de Dufuor *et al.*, 2008, el Hartón presenta $23,20\% \pm 1,70\%$ y el Guayabo $21,80\% \pm 0,10$, y en banano verde se indica un porcentaje de amilosa de $25,68 \pm 0,04$ (González y Pacheco-Delahaye, 2006). Al considerar otras fuentes vegetales, los contenidos de amilosa de los plátanos Hartón y Guayabo, están dentro del rango del porcentaje de amilosa de productos amiláceos tradicionales como papa con 20,10 a 31,00%; maíz normal con 22,40 a 32,50% y trigo con 18 a 30% (Singh *et al.*, 2003).

Se ha indicado que el contenido de amilosa de los gránulos de almidón varía con la fuente botánica y es afectado por las condiciones climáticas y tipo de suelo durante el crecimiento. La actividad de las enzimas involucradas en la biosíntesis del almidón puede ser responsable de la variación en el contenido de amilosa entre diferentes almidones, así como los distintos procedimientos de aislamiento y los métodos analíticos usados para determinar su contenido (Singh *et al.*, 2003).

4.2 FASE EXPERIMENTAL I. PROCESOS DE COCCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

4.2.1 Evaluación y cinética de firmeza

Al someter los productos vegetales a un tratamiento térmico como la cocción, éstos sufren diversos cambios en sus propiedades físicas, químicas, nutricionales, sensoriales y reológicas, los cuales dependen de las condiciones de procesamiento y naturaleza de los materiales. Siendo la textura una de las características más importantes en la apreciación de calidad que tienen los consumidores frente a los productos cocidos, este atributo también es importante considerarlo

como parte de las etapas de los procesos de transformación de las diversas materias primas, como lo realizado a nivel experimental con los plátanos Hartón y Guayabo.

Como parte del estudio de firmeza, expresada como firmeza relativa ($\frac{\text{Firmeza trozo cocido}}{\text{Firmeza trozo crudo}}$), se realizó un análisis de varianza de tres vías, con el fin de establecer la interacción entre los factores definidos en el diseño experimental (anexo 3). Teniendo en cuenta que el P valor para cada factor y las interacciones entre éstos (Variedad-Tratamiento, Variedad-Tiempo, Tratamiento-Tiempo, Variedad-Tratamiento-Tiempo), presentó un valor menor que 0,05, pues todos correspondieron a 0, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, lo que indica que la respuesta de la firmeza va a estar influenciada por el tipo de plátano utilizado, ya que la firmeza varía según el cultivar empleado, así como por el tratamiento y el tiempo de cocción al que se sometan los frutos.

Considerando que la variación de la firmeza relativa, está influenciada directamente por cada uno de los factores del diseño experimental planteado, para las dos variedades, ésta fue disminuyendo a medida que transcurría el tiempo en todos los tratamientos térmicos a los que fueron sometidas, como puede apreciarse en las figuras 29 y 30.

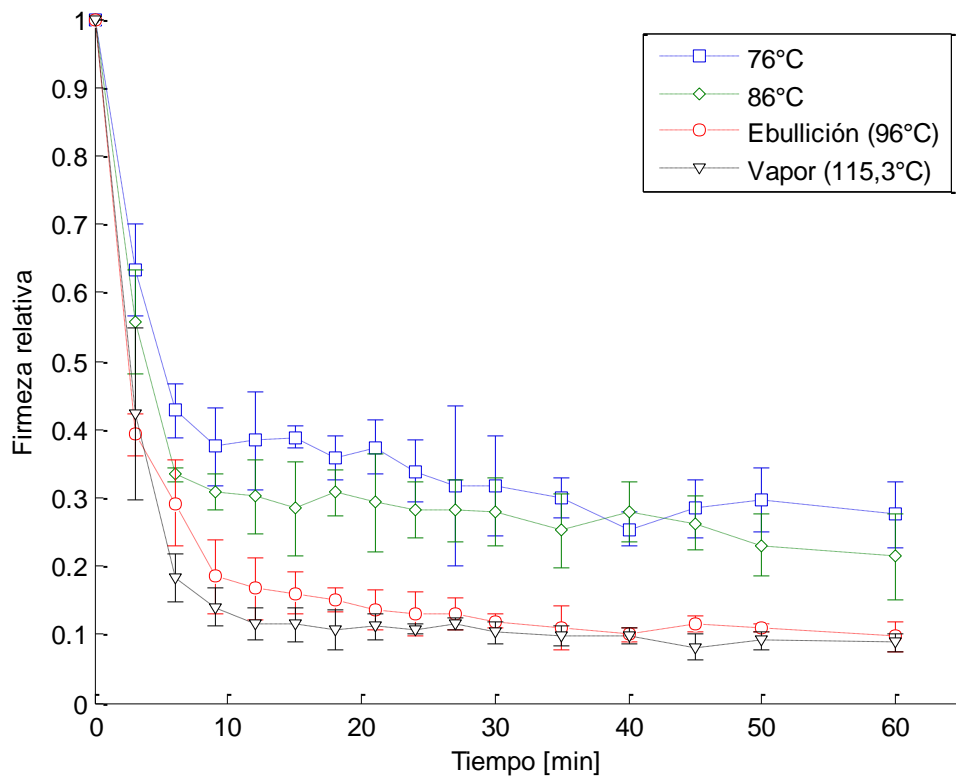


Figura 29. Disminución de la firmeza relativa de la variedad Guayabo a través del tiempo para cuatro tratamientos de cocción

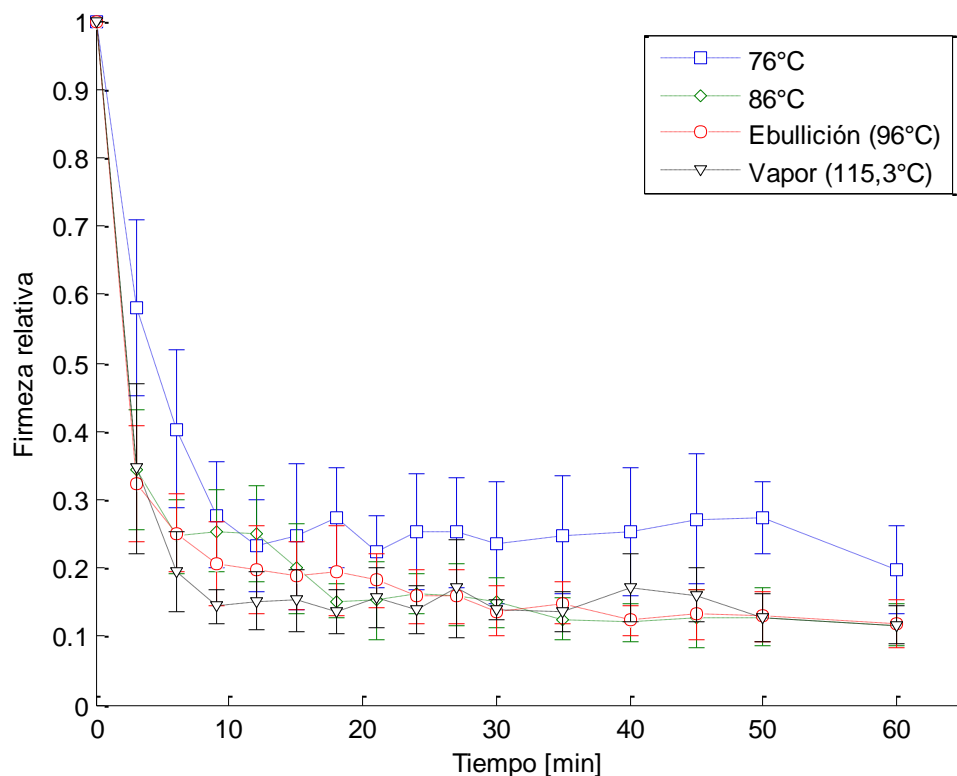


Figura 30. Disminución de la firmeza relativa de la variedad Hartón a través del tiempo para cuatro tratamientos de cocción

La condición de pérdida de firmeza en los primeros 10 min de cocción se dio de manera similar a lo presentado por Qi *et al.*, 2000, quienes trabajaron cocción con plátanos y bananos, empleando rodajas de 1 cm de espesor, a diferencia de los trozos de 4,5 cm de longitud utilizados en este estudio.

El marcado descenso de la firmeza del Hartón y el Guayabo en los primeros minutos de cocción para los cuatro tratamientos empleados, podría ser causado por el almidón, el cual genera una “presión de hinchamiento”, junto con expansión térmica de las células, ayudando de manera adicional a la separación celular (Qi *et al.*, 2000); con el aumento de la temperatura, se incrementa el hinchamiento de los gránulos por la ruptura de uniones más fuertes o zonas menos accesibles (Rosenthal, 2001, citado por Valencia y Torres, 2011). Así mismo, autores como Gibert *et al.*, 2010, consideran que el almidón podría contribuir a la firmeza inicial de las variedades de musáceas, como el principal ingrediente de los bananos y plátanos de cocción.

Adicionalmente al fenómeno de gelatinización presentado, el ablandamiento está dado por el rompimiento de la estructura celular, situación que en los productos vegetales es generada por factores como la pérdida de turgencia, el aire vascular y extracelular, así como degradación de los componentes de la membrana celular, e igualmente como a cambios en la pectina, en la capa de la lamela media, la que es responsable de aproximadamente el 95 – 97% de la firmeza del material crudo, la estructura molecular del almidón o aún en las diferencias en la estructura de los taninos condensados entre variedades (Hernández, 2007, Qi *et al.*, 2000, Gibert *et al.*, 2010).

Respecto a lo mencionado anteriormente, Qi *et al.*, 2000 indican que al parecer la solubilización inicial de relativamente pequeñas cantidades de un tipo particular de material péctico puede debilitar considerablemente el cemento intercelular, con una pérdida de la adhesión celular y la firmeza. El material péctico liberado posteriormente durante la cocción podría ser de diferente origen que el liberado inicialmente y podría sólo estar parcialmente relacionado con la resistencia de la pared celular, adicionalmente, es importante considerar que dadas la estructura y propiedades funcionales de la pectina, ésta se considera como el polímero de mayor interés de la pared celular, debido a su abundancia, solubilidad, sensibilidad a reacciones químicas y térmicas, lo que le permite determinar las características texturales de los productos vegetales procesados (Sila *et al.*, 2008).

Al observar de manera separada en la figura 31 la variación de la firmeza relativa en los tratamientos en agua a 76°C y 86°C, se encuentra que la variedad Guayabo presenta una firmeza relativa superior al Hartón en la medida que transcurre el tiempo para estos tratamientos, pese a que los valores de la firmeza de los materiales crudos fue mayor para el Hartón con un valor promedio de 89,88 N, mientras que la del Guayabo fue de 73,3 N, siendo el Hartón 22,62% más duro, como material sin procesar.

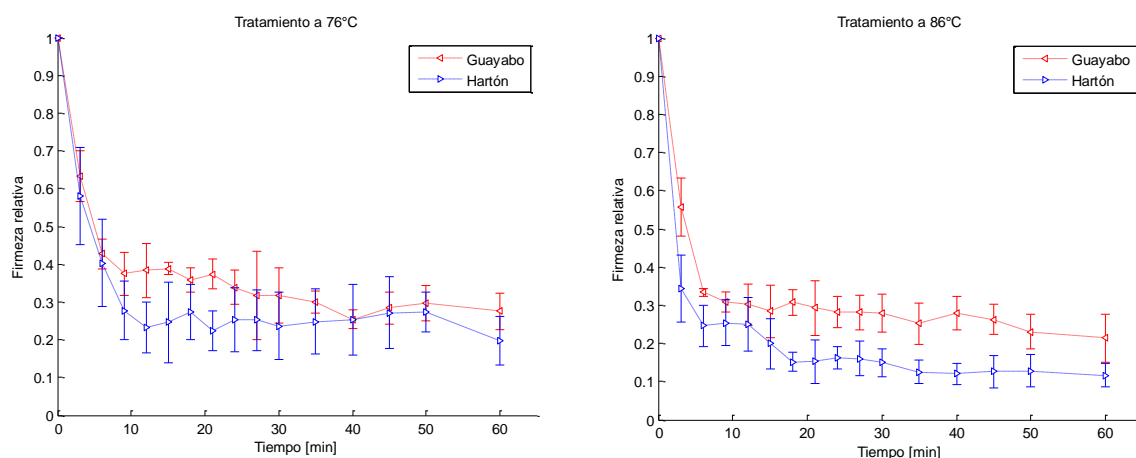


Figura 31. Disminución de la firmeza relativa en Guayabo y Hartón a través del tiempo para los tratamientos de cocción en agua a 76°C y a 86°C

Independiente al fenómeno de gelatinización del almidón, la condición de que el Guayabo presente mayores valores de firmeza relativa a través del tiempo, podría estar dada por aspectos propios de su composición, como el contar con una mayor proporción de sustancias pécticas, como las pectinas, presentes en los frutos inmaduros, que aunque no fueron cuantificadas y no se tienen reportes de su valor para estas variedades de plátano, podría considerarse que el Guayabo presente mayor proporción de pectinas de bajo metoxilo (pectinas con un 18 – 45% de metoxilación), las que requieren la presencia de iones calcio y pH de 2,8 a 6,5 (Baduí, 1999), por lo que bajo estas condiciones pueden establecer uniones iónicas con otras moléculas de pectina mediante el Ca^{2+} , generando una red con mayor resistencia a la deformación.

Esta situación pudo presentarse teniendo en cuenta que las condiciones de cocción se realizaron en un medio acuoso sin manipulación del pH, por lo que se estaría cerca al límite superior del rango de pH requerido para este mecanismo, además, la presencia de calcio, sería de tipo endógeno, ya que el Guayabo contiene 15,7 mg/100 g de materia seca, en comparación con el Hartón, cuyo valor es de 8,9 mg/100 g de materia seca (Dufour *et al.*, 2008), resultando ser 1,76 veces mayor en este mineral. Adicionalmente, el contenido de residuos de ácidos urónicos sin

esterificar puede ser incrementado por la acción de la enzima endógena pectinmetilesterasa (PME), la unión tiene una naturaleza cooperante y un incremento en el Ca^{2+} , contribuye a tejidos más firmes, situación más favorable para la temperatura de 76°C, donde se ha observado para productos como papa que la enzima presenta un rango óptimo de actividad entre 50 – 70°C (Kaaber *et al.*, 2007), así mismo se ha observado en procesos como el escaldado a bajas temperaturas (55 – 75°C) que se presenta una textura firme como resultado del fortalecimiento de las paredes celulares por la actividad de la pectinmetilesterasa (PME) y reducida desintegración de las sustancias intercelulares (Zhiqiang y Scanlon, 2007).

Adicionalmente a las diferencias asociadas con aspectos de composición de las dos variedades, que conducen a que el Guayabo presente mayor firmeza que el Hartón, es importante considerar que los diámetros de los trozos de Guayabo superan en 1,4 cm a los del Hartón, lo que hace que presente un área transversal de transferencia de calor mayor y esto produzca un ablandamiento más lento, particularmente a temperaturas inferiores a la de ebullición (96°C).

En cuanto a los tratamientos de cocción donde se emplea agua en ebullición y vapor, al observar individualmente los tratamientos para ambas variedades, se tiene de acuerdo con la figura 32 que el mecanismo de ablandamiento es similar, pues no se observa que exista una notable diferencia en la pérdida de firmeza entre éstas.

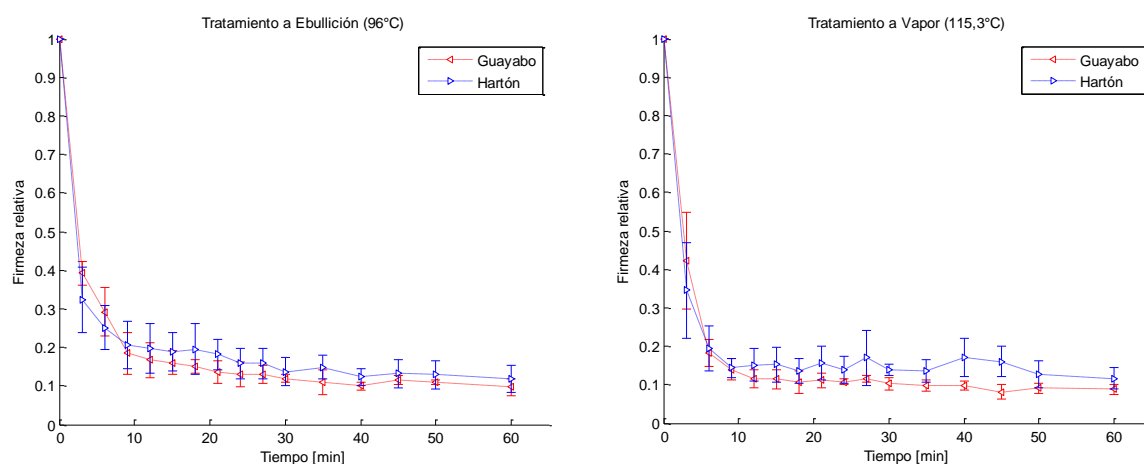


Figura 32. Disminución de la firmeza relativa en Guayabo y Hartón a través del tiempo para los tratamientos de cocción en agua en ebullición y con vapor.

Por las condiciones de los tratamientos en agua en ebullición y vapor donde las temperaturas del medio de cocción superan los 90°C, ha ocurrido una rápida gelatinización del almidón, inactivación de la enzima pectinmetilesterasa (PME) y degradación de las paredes celulares, evidenciándose en la rapidez con que cae la firmeza en los primeros minutos de cocción y alcanzando valores de firmeza en equilibrio más bajos que para los tratamientos en agua a 76°C y 86°C, como se relaciona en la tabla 9, en donde se reúnen estos parámetros, obtenidos mediante análisis de conversión fraccional.

Tabla 9. Valores de las constantes de velocidad aparente [k (min^{-1})] y firmeza relativa en equilibrio, en cuatro tratamientos de cocción para las variedades Hartón y Guayabo.

Constantes	GUAYABO				HARTÓN			
	Agua a 76°C	Agua a 86°C	Ebullición (96°C)	Vapor (115,3°C)	Agua a 76°C	Agua a 86°C	Ebullición (96°C)	Vapor (115,3°C)
k (min^{-1})	0,275 ± 0,032	0,346 ± 0,040	0,318 ± 0,023	0,374 ± 0,024	0,286 ± 0,035	0,435 ± 0,043	0,467 ± 0,044	0,466 ± 0,039
F_{∞}	0,325 ± 0,013	0,268 ± 0,011	0,127 ± 0,008	0,103 ± 0,007	0,242 ± 0,013	0,153 ± 0,009	0,155 ± 0,008	0,142 ± 0,007

Con base en los resultados de la tabla 9 puede apreciarse que a medida que aumenta la temperatura de cocción en los tratamientos, la constante k se incrementa, de acuerdo con Turhan y Gunasekaran, 2002, citados por Valencia y Torres, 2011, el valor de k aumenta cuando aumenta la temperatura, debido al incremento de reactividad almidón-agua. En cuanto a la firmeza relativa en equilibrio ésta disminuye, con una notoria reducción en la variedad Guayabo en los tratamientos de agua en ebullición y vapor, pudiendo apreciar la incidencia de la temperatura en ambos parámetros. En cuanto a la variedad Guayabo, pese a que el valor de la constante k para el tratamiento en agua en ebullición sea numéricamente inferior al del tratamiento en agua a 86°C, estadísticamente no presentan diferencias.

Comparando los valores de k para las variedades de plátano con los de yuca cocida a presión atmosférica a temperaturas de 75 y 96°C, se presentan valores de 0,0027 y 0,0334 min^{-1} (Millán *et al.*, 2011), los cuales resultan ser muy bajos considerando los obtenidos para Guayabo y Hartón, pero igualmente se evidencia la influencia de la temperatura en esta constante, infiriéndose además que la expresión numérica de k , estaría determinada por la naturaleza y geometría del material, pues la yuca es básicamente un alimento amiláceo con un 30 a 40% de materia seca, de la cual aproximadamente el 85% corresponde a carbohidratos (Morillo, 2009) y en el estudio citado se emplearon discos de 0,5 cm de espesor y 2,8 cm de diámetro.

Al observar los valores de la firmeza relativa en equilibrio para las dos variables y de acuerdo con el comportamiento de pérdida de firmeza, la variedad que resulta más susceptible al ablandamiento es el Hartón, pues en todos los casos presenta valores más bajos al compararlo con el Guayabo.

Autores como Ngalani y Tchango Tchango (1997), citados por Gibert *et al.*, 2010, indican que una buena calidad culinaria de los plátanos está relacionada con su alto contenido de materia seca. Al determinar este parámetro, como se había mencionado en las características de las materias primas, los valores calculados correspondieron a 37,53% para Guayabo y 39,76% para Hartón. Si se tiene en cuenta que con porcentajes más altos de materia seca se tendrían materiales crudos con mayor firmeza, esta situación pudo evidenciarse con los valores de firmeza de los plátanos crudos, que se habían mencionado previamente, en donde se obtuvo un valor promedio de firmeza para el Guayabo de 73,30 N ± 12,42 y para el Hartón de 89,88 N ± 13,89, relación que se conserva de acuerdo con lo reportado para estos dos cultivares por Gibert *et al.*, 2010.

En cuanto a la relación de la materia seca con la variación de la firmeza durante los tratamientos de cocción, más que una apreciación general de la incidencia global de componentes que conforman la parte no acuosa, serían compuestos particulares como el almidón, pectina y minerales, los que estarían determinando las variaciones en firmeza de estos frutos por los tratamientos térmicos a los que se sometieron.

Pese a que se gelatinice más rápido el almidón en el Guayabo que en el Hartón en los tratamientos en agua a 76°C y 86°C como se evidencia en los valores más altos de k para la cinética de gelatinización (tabla 12), este fenómeno no está influyendo de manera determinante en el

ablandamiento del Guayabo, como si lo estaría haciendo en el Hartón, esto considerando que la variedad Hartón es más susceptible a este fenómeno bajo estas condiciones por lo representado en los valores de firmeza relativa en equilibrio más bajos, lo que también se aprecia en la figura 33 para el factor de reducción de la firmeza, el cual se estableció como la relación de $\frac{\text{Firmeza relativa del material crudo}}{\text{Firmeza relativa en equilibrio}}$, en donde valores más altos del factor de reducción de la firmeza, corresponden a materiales con mayor ablandamiento.

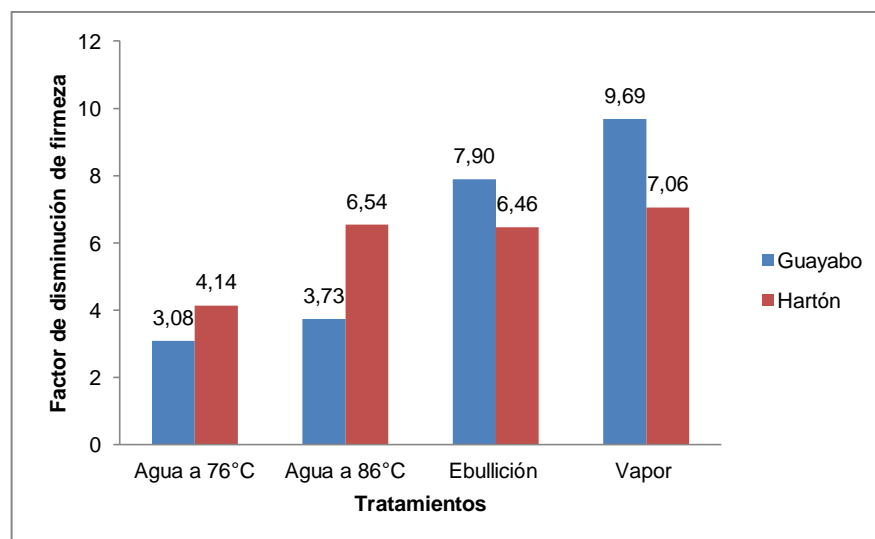


Figura 33. Factor de disminución de firmeza

Bajo condiciones de ebullición y tratamiento con vapor es el Guayabo la variedad que más se ablanda considerando los valores de la firmeza relativa en equilibrio que son menores que los del Hartón y valores más altos de factor de disminución de la firmeza, bajo estas condiciones el almidón se ha gelatinizado en cortos períodos de tiempo, ha ocurrido inactivación enzimática y posible solubilización del calcio al medio de cocción.

4.2.2 Análisis térmico de las harinas por calorimetría diferencial del barrido

Como bien es conocido, el almidón juega un papel de gran importancia como constituyente de los alimentos, por su aporte calórico y por sus propiedades funcionales que le confieren condiciones de aplicación como ingrediente alimentario. La determinación de características fisicoquímicas como la gelatinización, es requerida para establecer su utilización en el procesamiento de productos alimenticios, pero igualmente con base en este fenómeno, podría identificarse las diferencias en el comportamiento de materiales amiláceos que están sometidos a tratamientos térmicos, como lo planteado con los frutos de los plátanos Hartón y Guayabo.

Al realizar el estudio de gelatinización en las harinas crudas de los plátanos, los valores de las temperaturas de pico de gelatinización de 74,63°C en el Hartón y 75,31°C en el Guayabo, guardan similitud a valores reportados en otros estudios en donde se relaciona para el plátano temperatura de pico de 75,94°C \pm 0,19 (Vergara, 2012) y variedades de plátano Macho y Criollo de 77°C y 74°C respectivamente (Zhang *et al.*, 2005). En cuanto a la entalpía de gelatinización del almidón en variedades como el plátano Macho se tiene un rango de 14,00 a 16,80 J/g (Zhang *et al.*, 2005), valores ligeramente superiores a los obtenidos para Hartón de 13,39 J/g y para el Guayabo de 14,57 J/g, aunque en otro estudio realizado sobre plátano se reporta una entalpía de gelatinización de 11,05 \pm 0,021 J/g y temperatura de pico de gelatinización de 76,15°C \pm 0,14 (Carlos, 2010).

Adicionalmente, la temperatura de pico de gelatinización y las entalpías de gelatinización en estas variedades de plátano fueron mayores a las de almidones de maíz y papa, con temperaturas de pico de 66,30°C y 69,00°C respectivamente y entalpías de 10,30 J/g para el maíz y 4,60 J/g para papa (de la Torre *et al.*, 2008), pese a sus similitudes en los contenidos de almidón y amilosa, las variaciones estarían en función principalmente del origen botánico, pues almidones de diferentes fuentes, difieren en composición y exhiben distintas temperaturas de transición y entalpías de gelatinización (Singh *et al.*, 2009).

Con base en los análisis efectuados de gelatinización del almidón en las harinas crudas y cocidas de Hartón y Guayabo, pudo establecerse que en el lapso de 9 minutos en todos los tratamientos, ha ocurrido gelatinización del almidón en más de un 80%, a excepción del tratamiento en agua a 76°C para el Hartón, en el que sólo se ha gelatinizado el 42,89%, como se relaciona en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Temperaturas y grados de gelatinización del almidón para harinas crudas y cocidas de Hartón

Tratamiento	Tiempo (min)	Temperatura de inicio (T°C)	Temperatura de pico (°C)	Temperatura de finalización (°C)	Entalpía (J/g)	Intervalo de gelatinización -lg-(°C)	% Gelatinización
Crudo	0	70,88	74,63	82,71	13,39	11,83	0
A76	3	72,01	76,48	85,78	10,63	13,77	28,70
	9	73,81	78,27	89,00	8,510	15,19	42,89
	12	74,36	78,48	89,80	8,05	15,44	49,87
	15	75,29	79,02	89,08	7,84	14,51	51,14
	30	81,55	85,70	90,75	3,39	9,20	77,26
	60	82,40	86,29	91,42	3,32	9,02	79,32
A86	3	70,18	74,29	83,40	10,03	13,23	32,68
	9	80,62	85,39	90,22	2,09	9,60	85,95
	12	83,44	87,81	97,16	0,95	13,73	93,64
	15	84,71	88,80	94,60	0,70	9,89	95,33
Ebullición	3	72,61	77,14	87,57	7,19	14,96	52,54
	6	76,12	79,46	90,78	3,88	14,66	73,96
	9	82,49	86,42	91,48	0,92	8,99	93,84
Vapor	3	68,76	72,76	80,35	7,76	11,59	44,49
	6	NR	NR	NR	NR	NR	NR

*NR: No se reportan datos, porque no fue posible detectar cambios de entalpía, considerando 100% de gelatinización.

Tabla 11. Temperaturas y grados de gelatinización del almidón para harinas crudas y cocidas de Guayabo

Tratamiento	Tiempo (min)	Temperatura de inicio (T°C)	Temperatura de pico (°C)	Temperatura de finalización (°C)	Entalpía (J/g)	Intervalo de gelatinización -lg-(°C)	% Gelatinización
Crudo	0	70,70	75,31	84,32	14,57	13,63	0
A76	3	71,62	75,24	83,62	11,46	12,00	21,36
	9	78,16	84,31	89,69	2,94	11,53	80,80
	12	81,15	85,18	90,46	2,88	9,31	81,20
	15	78,13	82,21	87,83	1,65	9,70	88,66
	30	81,42	83,69	87,76	0,30	6,20	97,83
A86	3	69,81	73,89	84,04	3,53	14,24	75,75
	12	85,36	88,43	93,97	0,70	8,61	95,33
Ebullición	3	74,96	79,35	83,20	2,11	8,23	85,47
	6	83,19	88,61	91,88	0,67	8,69	95,19
Vapor	3	71,94	76,93	84,26	7,36	12,32	49,53
	6	NR	NR	NR	NR	NR	NR

*NR: No se reportan datos, porque no fue posible detectar cambios de entalpía, considerando 100% de gelatinización.

De acuerdo con los resultados consignados en las tablas 10 y 11, puede apreciarse para cada tratamiento, el incremento de las temperaturas de inicio, pico y finalización de la gelatinización, a medida que aumenta el tiempo de cocción, el incremento en la temperatura de gelatinización comparado con el almidón de las muestras crudas, podría deberse a la estructura coloidal molecular del gránulo de almidón, longitud de la cadena de amilopectina y reordenamiento de la estructura cristalina después del tratamiento térmico (Kittipongpatana, y Kittipongpatana, 2011).

El almidón presente en la harina de la variedad Guayabo en el tratamiento en agua a 76°C a los nueve minutos, se ha gelatinizado en un 80,80% y alcanza el 97,83% de gelatinización a los 30 minutos, mitad del tiempo total de experimentación, mientras que en el Hartón a este mismo tiempo se ha gelatinizado el 77,26% de su almidón y no supera el 80% con el tiempo máximo de cocción que fue de 60 minutos. Al analizarse estadísticamente los valores de las entalpías del tratamiento en agua a 76°C, mediante un análisis de varianza en dos vías, variedad y tiempo, con un nivel de confianza del 95% (anexo 4), los P valor obtenidos para cada factor así como para su interacción, fueron menores de 0,05 ($P_{valor} = 0,000$), con lo que se rechaza la hipótesis nula, que considera que las medias de las entalpías son iguales, aceptando la hipótesis alterna, en donde las entalpías y en consecuencia los porcentajes de gelatinización son diferentes para cada variedad y para los tiempos analizados; la drástica caída en la energía (entalpía) requerida para la gelatinización indica la pérdida del orden molecular en los gránulos pregelatinizados (Kittipongpatana, y Kittipongpatana, 2011).

Al observar los valores del grado de gelatinización expresado en porcentaje para los almidones de las harinas obtenidas de los tratamientos en agua a 86°C y a 96°C (ebullición), también se encuentra que en el Guayabo, el almidón alcanza altos niveles de gelatinización en tiempos más cortos de proceso.

Pese a que los materiales estudiados corresponden al mismo genotipo (AAB) y aunque pertenecen a subgrupos distintos, las diferencias encontradas en los porcentajes de gelatinización podrían estar dadas por condiciones como contenidos distintos en materia seca, almidón y amilosa, además el almidón presente en éstos podría tener estructuras granulares y moleculares diferentes, como el ordenamiento intragranular, por lo que mientras más alto sea este valor, mayor será el grado de asociación entre las macromoléculas en el interior del gránulo de almidón (Bou *et al.*, 2006), lo que estaría influenciado por la relación amilosa/amilopectina, la temperatura del

tratamiento de cocción estaría influyendo sobre las características químicas, como aspectos asociados a solubilización de amilosa o amilopectina, o provocando reacomodamientos de tipo estructural. Además, aspectos físicos como la longitud de las cadenas, el empaquetamiento molecular, particularmente de la amilopectina, así como el tamaño y forma de los gránulos de almidón, serían los que estarían incidiendo en las diferencias en los porcentajes de gelatinización, así como en las temperaturas de inicio, pico y finalización de la gelatinización, especialmente para el tratamiento a 76°C.

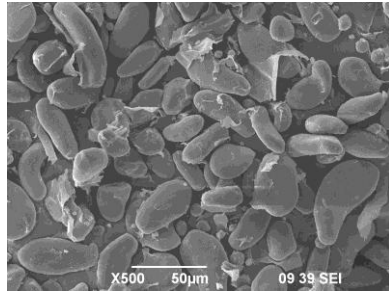
Si se tiene en cuenta que conceptualmente se menciona que la gelatinización se produce inicialmente en las regiones amorfas, debido a que los enlaces de hidrógeno se debilitan en estas áreas y un alto grado de cristalinidad estructural proporciona estabilidad, haciendo al gránulo más resistente a la gelatinización, lo que resulta en mayores temperaturas de transición, afectada por la composición química del almidón (Singh *et al.*, 2009), lo que podría estar ocurriendo es que en el Hartón se presenten zonas con mayor grado de cristalinidad, o que la configuración de la amilosa que posee esté generando un efecto de resistencia a ser gelatinizado cuando se trata con la temperatura más baja de cocción (76°C), adicionalmente, cada gránulo posee su propia temperatura de gelatinización, debido a diferencias estructurales individuales (es la arquitectura lo que determina la resistencia a hidratarse), así cuando se tiene una población de gránulos, se habla de rango de temperatura de gelatinización, y no de una temperatura de gelatinización fija. (Cuggino, 2006).

De acuerdo con lo anterior, se observa en el tratamiento en agua a 76°C para los mismos tiempos de cocción, que las muestras de Hartón alcanzan bajos porcentajes de gelatinización comparadas con las de Guayabo, aunque las temperaturas de transición no sean mayores, si lo son los intervalos de temperatura de gelatinización (Ig), encontrándose diferencias significativas en estos valores ($P_{\text{valor}} < 0,05$) (anexo 4) y con respecto a éstos, se ha indicado que un valor mayor de Ig sugiere un material más ordenado (Rivas *et al.*, 2008), con mayores cambios en la energía de gelatinización (ΔH), apreciados en los tratamientos con agua a 76°C y para los tres minutos de cocción en agua a 86°C para el Hartón.

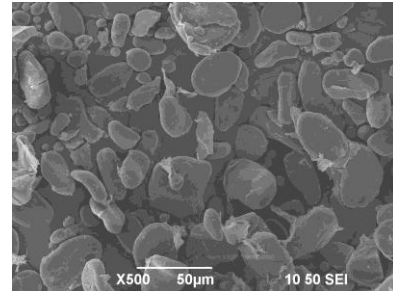
En maíz se encontró que gránulos grandes de almidón de los granos suaves gelatinizan a temperaturas más bajas y entalpías más altas que los gránulos pequeños de granos duros. Esto puede deberse a un arreglo menos ordenado de las cadenas de polisacáridos en los gránulos pequeños, cuyos cristales podrían ser menos estables (Narváez *et al.*, 2007), situación que se presentó de manera similar a las muestras de plátano Hartón, en donde muchas de las temperaturas de pico de gelatinización fueron menores y las entalpías de gelatinización mayores a las del Guayabo, por lo que condiciones asociadas con tamaño y configuración de los gránulos, estarían teniendo incidencia como se ha mencionado, en las diferencias en el grado de gelatinización.

Una característica fundamental de los almidones nativos de diferentes fuentes vegetales es que la distribución del tamaño de sus gránulos y las estructuras moleculares, influyen en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales (de la Torre *et al.*, 2008). Al comparar la forma de los gránulos de almidón en las harinas crudas de Hartón y Guayabo obtenidas en el desarrollo de la experimentación, de acuerdo con la figura 34 puede apreciarse que los gránulos de ambas variedades presentan morfologías heterogéneas, siendo más representativa la forma elongada. Los gránulos del Hartón se presentan de forma más alargada que los del Guayabo y este tipo de gránulos podría estar influyendo en el mecanismo de gelatinización, según Casarrubias *et al.*, 2012, los gránulos alargados tienen amilopectina con pocas ramificaciones pero largas y gránulos pequeños y esféricos presentan mayor número de ramificaciones y cadenas cortas, el grado de polimerización (GP) de las ramificaciones está directamente relacionado con las características fisicoquímicas como la tendencia a retrogradar, la temperatura y entalpía de gelatinización y el tipo de cristal del almidón de plátano. Las cadenas cortas (GP ~ 12 – 24), son características de un

cristal tipo A, éstas generalmente presentan temperaturas de gelatinización menor y retrogradan a velocidad mayor, en cambio cadenas largas ($GP > 25$) son características de un cristal tipo B, gelatinizan a temperatura mayor y su velocidad de retrogradación es menor (Carlos, 2010), condiciones que pudieron influir en las diferencias en los porcentajes de gelatinización, en donde posiblemente una mayor proporción de cristales tipo A pudieron influir para que en condiciones menores a las de ebullición, en el Hartón se alcanzaran mayores dificultades para la gelatinización de su almidón.



a) Harina Cruda de plátano Hartón



b) Harina Cruda de plátano Guayabo.

Figura 34. Microfotografías SEM de harinas crudas de plátanos Hartón y Guayabo

4.2.2.1 Cinéticas de gelatinización del almidón presente plátanos Hartón y Guayabo

Durante el proceso de gelatinización, las moléculas de almidón vibran rompiendo los puentes de hidrógeno intermoleculares de las zonas amorfas de los gránulos, lo que provoca el hinchamiento por una absorción progresiva e irreversible de agua que finalmente se liga a la estructura. Una vez la parte amorfa del gránulo se ha hidratado completamente, la parte cristalina inicia un proceso similar, disminuyendo el número y tamaño de las regiones ordenadas. Se estima que un gránulo gelatinizado ha perdido tanto orden de corto alcance (a nivel molecular) como de largo alcance (cristalinidad) (Pineda *et al.*, 2010), situación que es progresiva con el incremento de la temperatura.

En las figuras 35 y 36 puede apreciarse el comportamiento de las muestras con respecto a la gelatinización, encontrándose que a medida que avanza el tiempo de cocción y se incrementa la temperatura del tratamiento, aumenta el porcentaje de almidón que es gelatinizado.

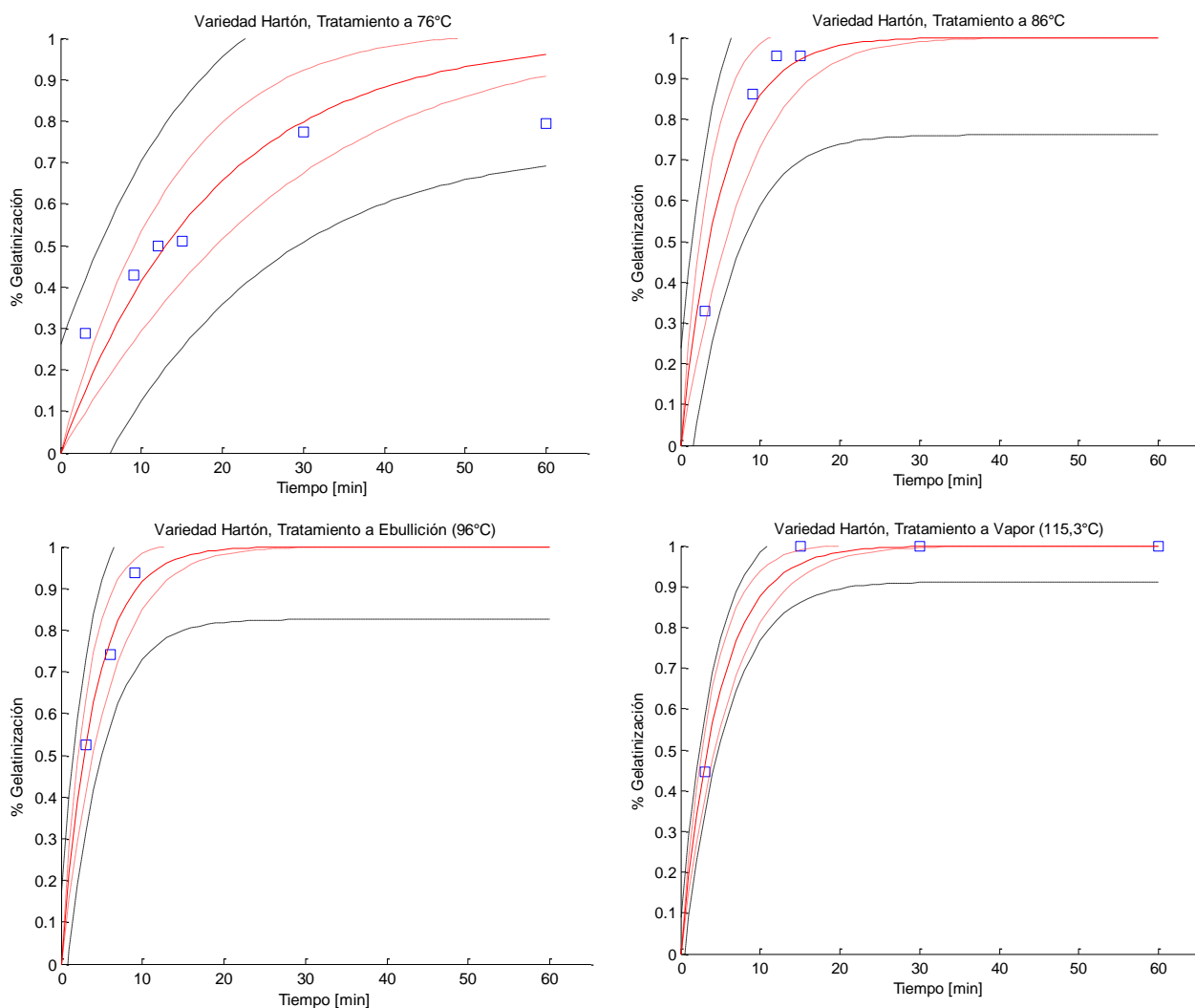


Figura 35. Cinética de gelatinización del almidón para la variedad Hartón en cuatro tratamientos de cocción. (Cuadros de color azul corresponden a datos experimentales, líneas centrales continuas de color rojo corresponden a la predicción del modelo, líneas intermitentes rojas pertenecen al intervalo de 95% de confianza y las líneas externas negras corresponden al intervalo del 95% de confianza donde se encontrarán nuevas observaciones)

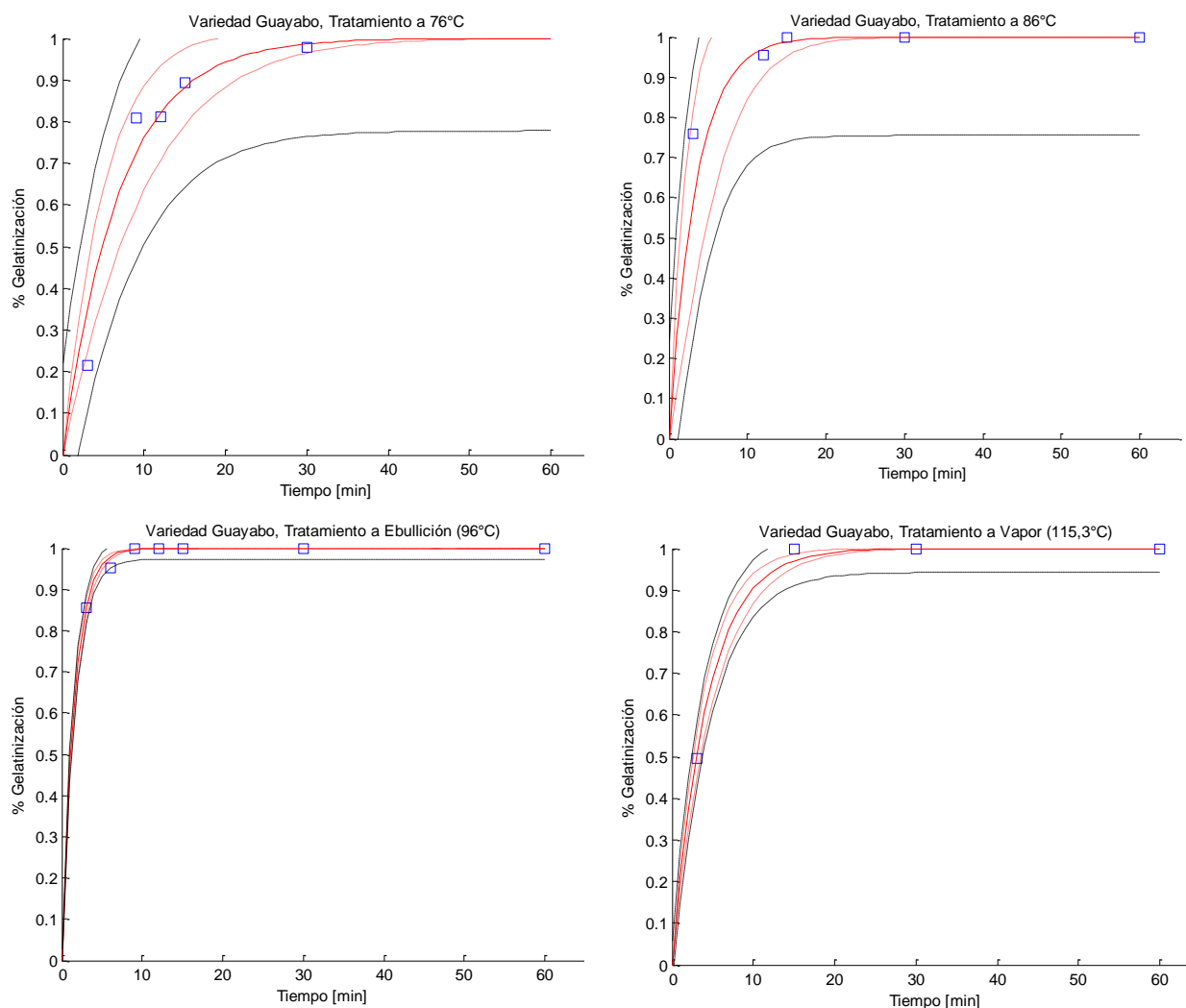


Figura 36. Cinética de gelatinización del almidón para la variedad Guayabo en cuatro tratamientos de cocción. (Cuadros de color azul corresponden a datos experimentales, líneas centrales continuas de color rojo corresponden a la predicción del modelo, líneas intermitentes rojas pertenecen al intervalo de 95% de confianza y las líneas externas negras corresponden al intervalo del 95% de confianza donde se encontrarán nuevas observaciones)

Se estableció mediante la ecuación 17 (sección metodología) la cinética de gelatinización del almidón, definiendo para los tratamientos empleados, los valores de la constante k (min^{-1}), los cuales se relacionan en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetro k (min^{-1}) de la cinética de gelatinización del almidón en harinas cocidas de plátanos Guayabo y Hartón.

Variedad	Tratamiento de cocción			
	Agua a 76°C	Agua a 86°C	Agua en ebullición (96°C)	Vapor (115,3°C)
Guayabo	$0,143 \pm 0,053$	$0,291 \pm 0,186$	$0,641 \pm 0,059$	$0,234 \pm 0,037$
Hartón	$0,053 \pm 0,020$	$0,195 \pm 0,089$	$0,247 \pm 0,079$	$0,208 \pm 0,050$

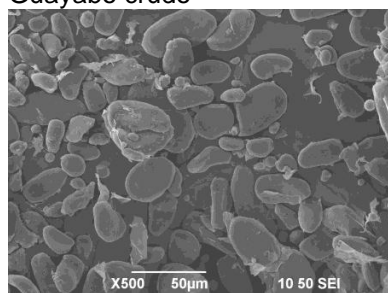
En los tratamientos en agua a las temperaturas de 76, 86 y 96°C para ambas variedades, el parámetro k , aumenta con el incremento de la temperatura del medio de cocción, confirmándose que la velocidad de gelatinización se hace mayor en la medida que este parámetro es más alto (Turhan y Gunasekaran, 2002), por lo que al comparar a una misma condición de cocción, es decir, a igual tiempo y temperatura para Hartón y Guayabo, el Guayabo por sus valores más altos de k , alcanza porcentajes de gelatinización mayores que el Hartón.

Los valores de k para el tratamiento con vapor en ambas variedades resultaron ser más bajos que los k de ebullición, sin seguir la tendencia anteriormente mencionada, situación más determinante para la variedad Guayabo, donde hay una gran diferencia entre los k de ebullición y vapor, al considerar este aspecto, podría indicarse que al analizar la tendencia de k , el tratamiento con vapor no es comparable con tratamientos donde se utiliza agua líquida, y se requeriría una valoración de la tendencia de la constante, empleando diferentes temperaturas para el método con vapor.

Los valores más bajos de k de gelatinización para el tratamiento con vapor para las dos variedades podrían estar sujetos a características como la formación de costra, la que se estaría presentando por la incidencia de la alta temperatura del vapor que provoca un aumento en la velocidad de salida del agua provocando que esta parte resulte más seca y posiblemente el almidón de esta zona periférica se gelatinice más fácilmente, lo que dificultó la accesibilidad de agua a los demás gránulos de almidón, además en el tratamiento de los trozos para realizar la determinación del porcentaje de almidón se requirió molerlas y como consecuencia de esta operación pudieron quedar en las harinas obtenidas fracciones de almidón gelatinizadas y sin gelatinizar, que pudieron estar presentes en el material analizado (Turhan y Gunasekaran, 2002).

Los cambios en los almidones asociados con el proceso de gelatinización pueden apreciarse en las microfotografías de las harinas cocidas como se muestra en las figuras 37 a 40, en las cuales se observa como con el tiempo y la temperatura de cocción los gránulos embeben agua, se hinchan y se rompen.

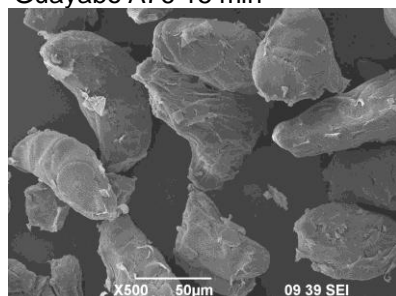
a) Guayabo crudo



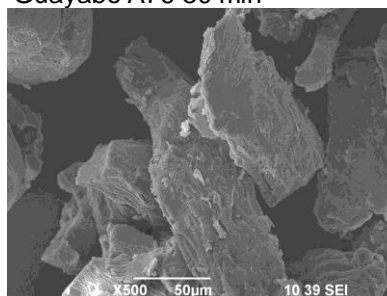
b) Guayabo A76 3min



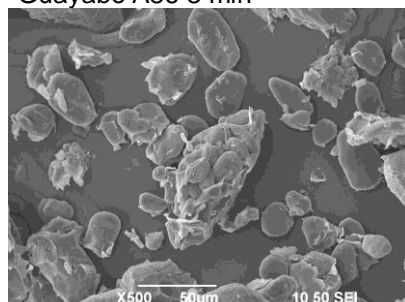
c) Guayabo A76 15 min



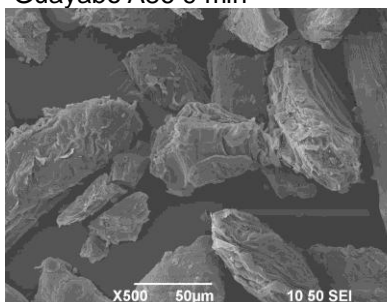
d) Guayabo A76 30 min



e) Guayabo A86 3 min



f) Guayabo A86 9 min



g) Guayabo A86 15 min

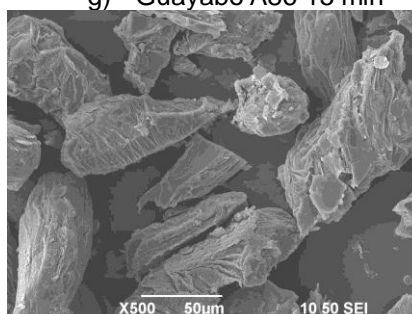
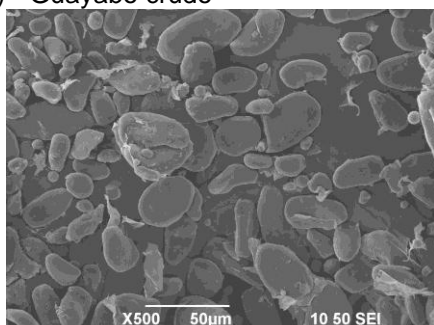
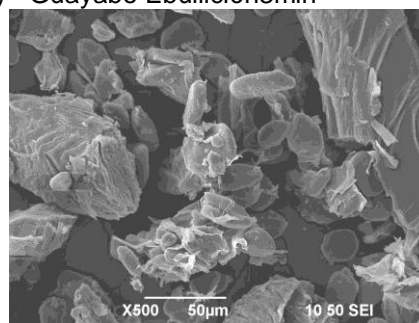


Figura 37. Microfotografías SEM para harinas de Guayabo obtenidas por tratamientos de cocción en agua a 76 y 86°C

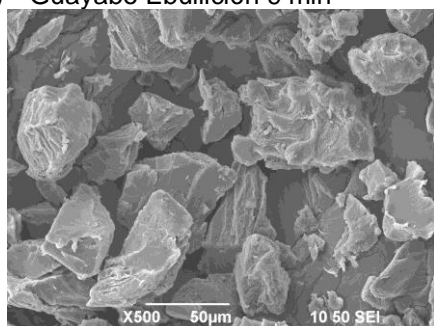
a) Guayabo crudo



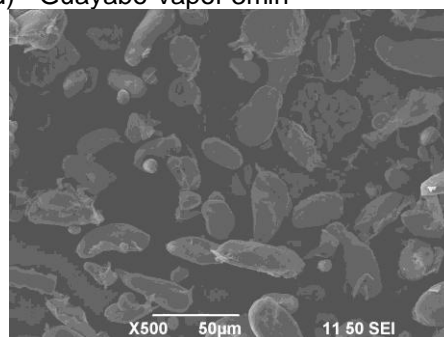
b) Guayabo Ebullición 3min



c) Guayabo Ebullición 9 min



d) Guayabo Vapor 3min



e) Guayabo Vapor 6 min

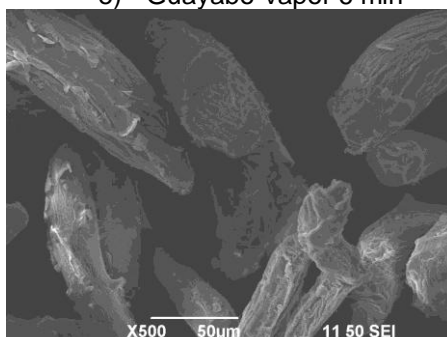
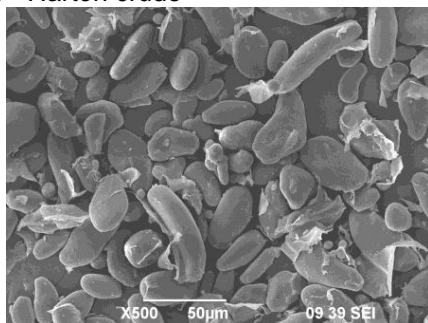
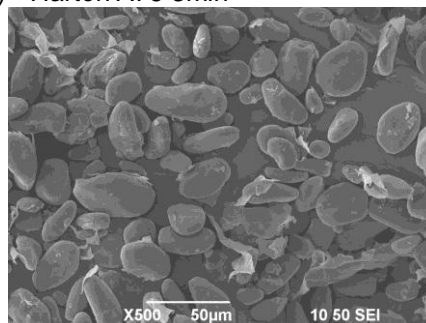


Figura 38. Microfotografías SEM para harinas de Guayabo obtenidas por tratamientos de cocción en agua en ebullición y con vapor

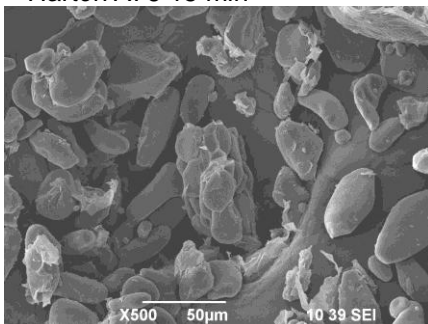
a) Hartón crudo



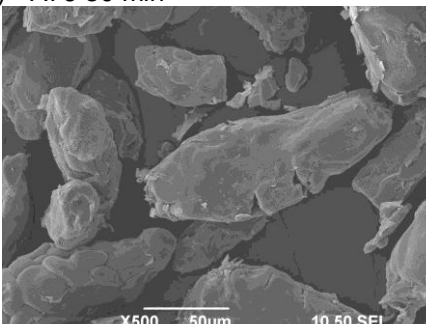
b) Hartón A76 3min



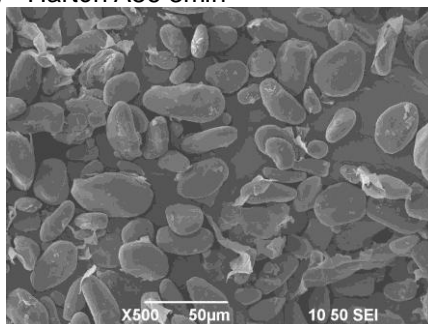
c) Hartón A76 15 min



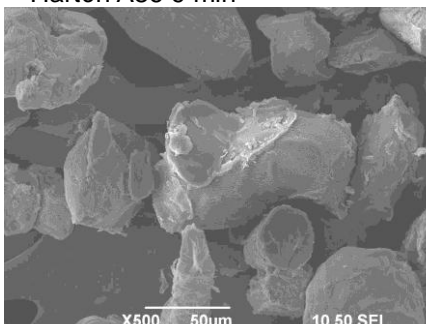
d) A76 30 min



e) Hartón A86 3min



f) Hartón A86 9 min



g) Hartón A86 15 min

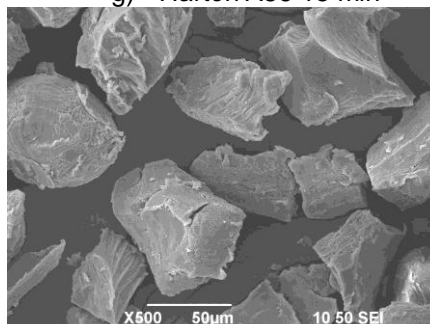


Figura 39. Microfotografías SEM para harinas de Hartón obtenidas por tratamientos de cocción en agua a 76 y 86°C

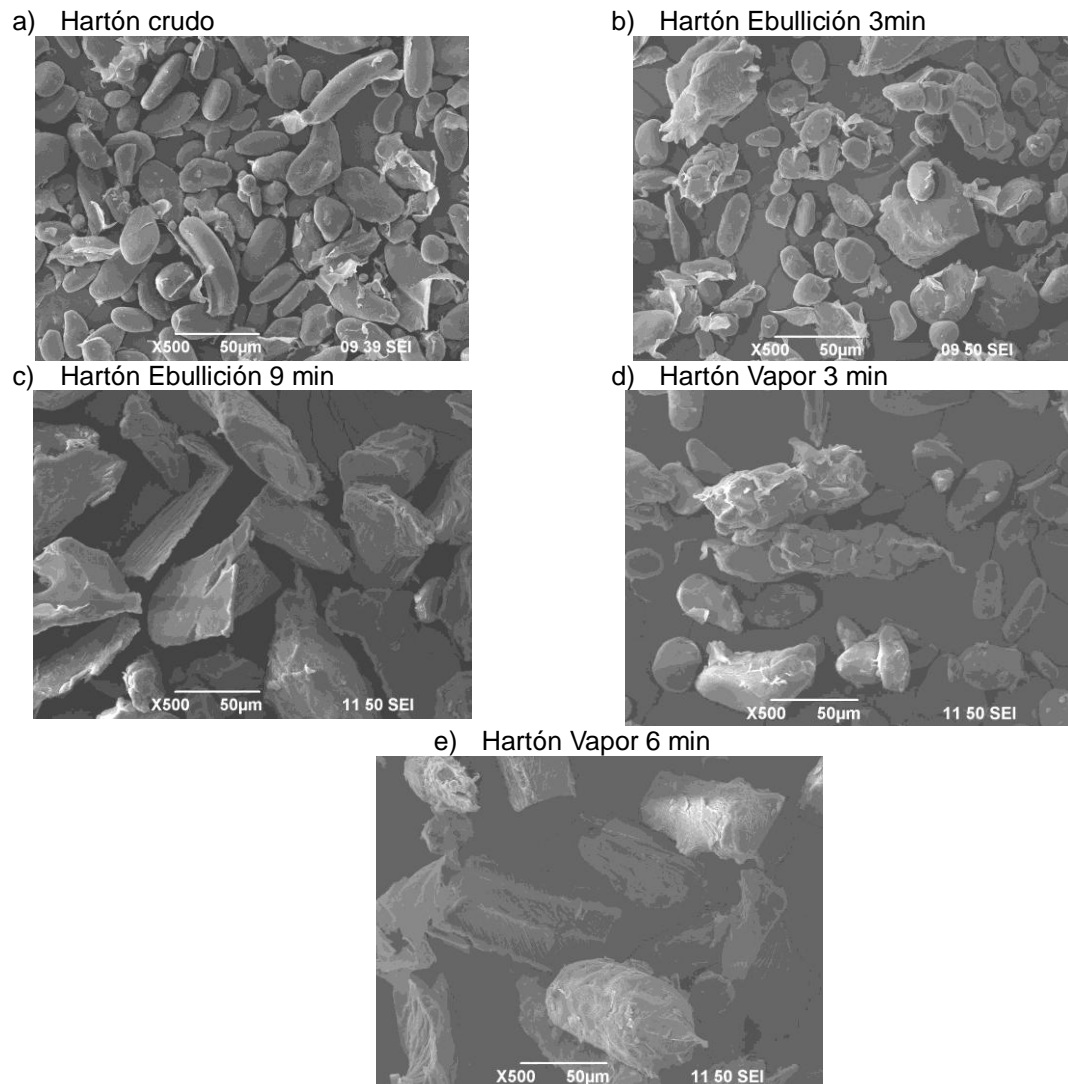


Figura 40. Microfotografías SEM para harinas de Hartón obtenidas por tratamientos de cocción en agua en ebullición y con vapor

La intensidad de la gelatinización depende de la temperatura y el contenido de humedad, es irreversible, inicialmente aumenta el tamaño de los gránulos y produce un incremento en la viscosidad de la suspensión, varía con las condiciones de cocción (como el pH) y con el tipo de gránulo de almidón (fuente botánica) (Huang y Rooney, 2001). Anteriormente se había mencionado que el hinchamiento inicial probablemente se lleva a cabo en las regiones amorfas del gránulo, donde los polímeros son más susceptibles a la disociación. Cuando la estructura comienza a debilitarse, el gránulo se embebe en agua y se hincha (Rodríguez^b *et al.*, 2006), situación que se aprecia en todos los tratamientos, con los cambios más drásticos cuando se emplea agua en ebullición y cocción con vapor, además el comportamiento de estos materiales a la acción de la temperatura es similar a lo que ocurre con otros productos como los cereales, en los que la temperatura de proceso está involucrada en la gelatinización y retrogradación del almidón presente (Tribess *et al.*, 2009).

Adicionalmente, se sabe que los gránulos de almidón en un mismo genotipo, pueden variar en su tamaño, composición y grado de cristalinidad, lo que provoca que unos sean más resistentes que otros a los factores gelatinizantes del medio (Salinas *et al.*, 2003), lo que ocurrió con el Guayabo, más susceptible a la acción de la temperatura y en donde el almidón se gelatinizó más fácil y rápidamente.

4.2.3 Curvas de viscosidad durante la formación de pasta en solución acuosa

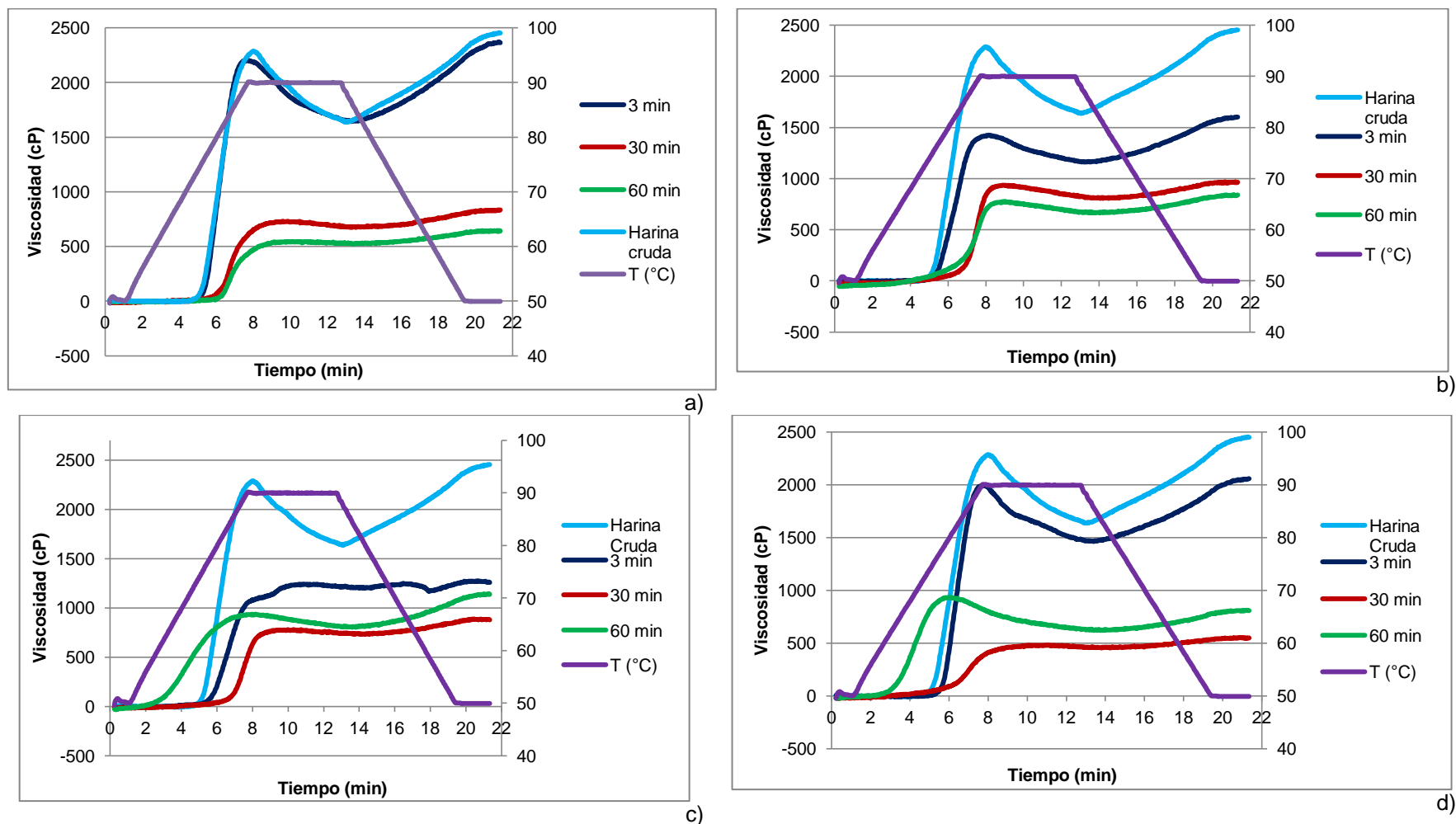


Figura 41. Curvas de formación de pasta de harinas de Guayabo obtenidas en los diferentes tratamientos de cocción de los frutos a 3, 30 y 60 minutos. a) Cocción en agua a 76°C, b) Cocción en agua a 86°C, c) Cocción en agua en ebullición, d) Cocción con vapor

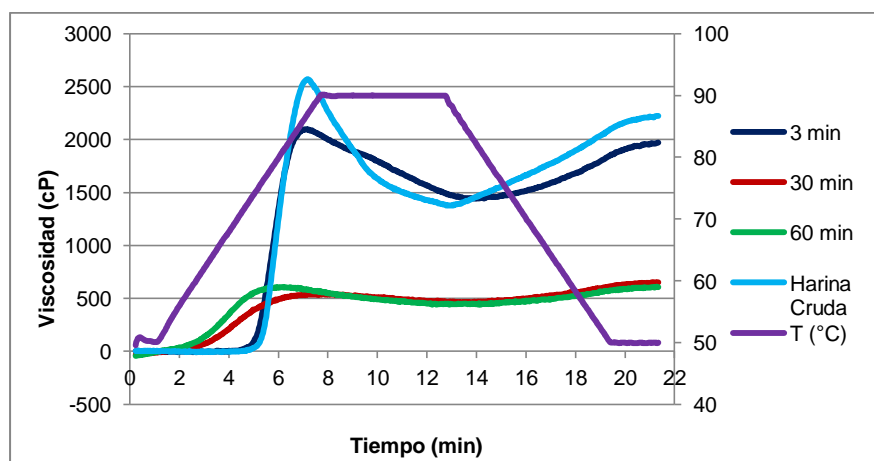
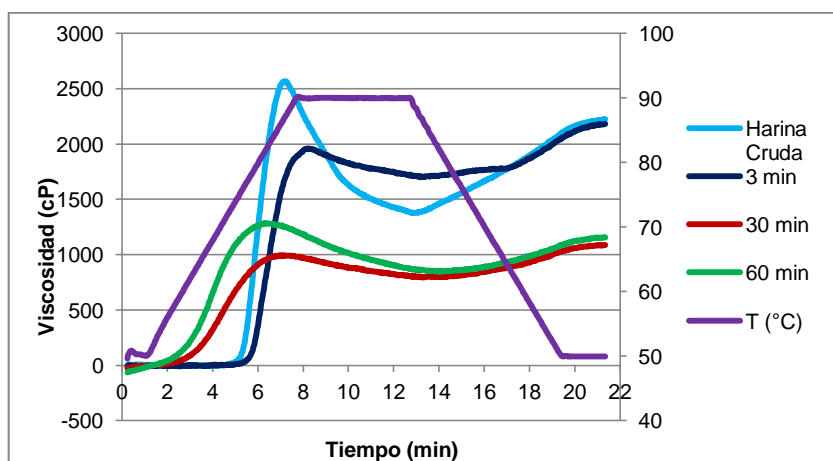
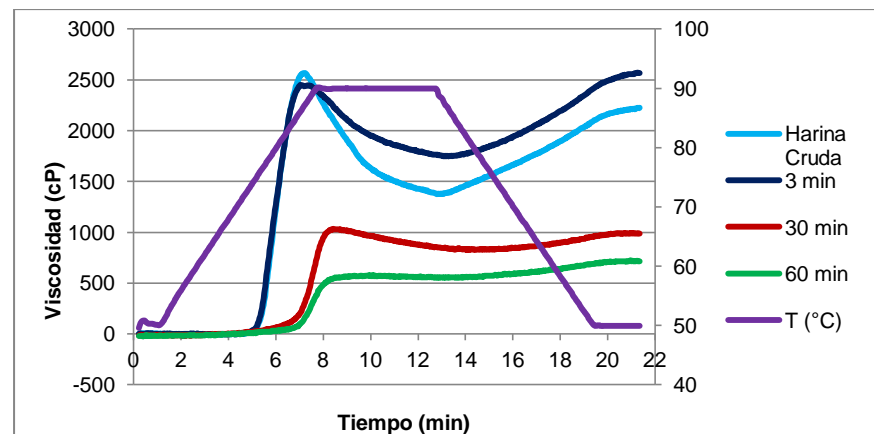
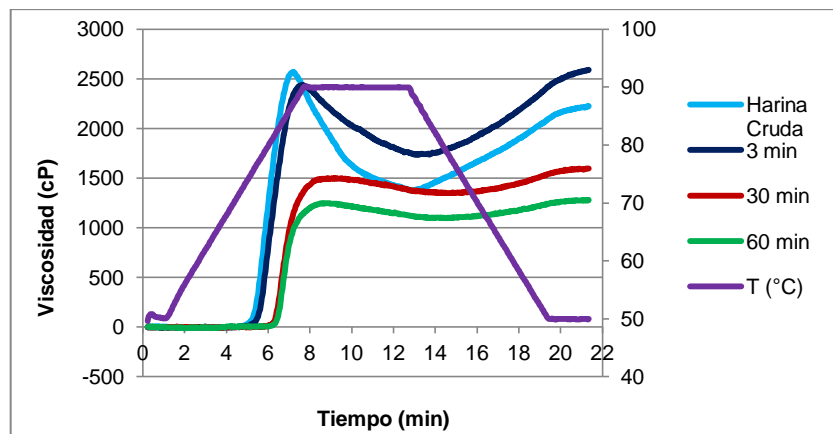


Figura 42. Curvas de formación de pasta de harinas de Hartón obtenidas en los diferentes tratamientos de cocción de los frutos a 3, 30 y 60 minutos. a) Cocción en agua a 76°C, b) Cocción en agua a 86°C, c) Cocción en agua en ebullición, d) Cocción con vapor

En la tabla 13 se reúnen los valores obtenidos de los parámetros considerados para el análisis, a partir de las curvas de formación de pasta.

Tabla 13. Parámetros de las curvas de formación de pasta para harinas crudas y cocidas de Guayabo y Hartón.

Variedad	Tiempo (min)	Tratamiento	Temparatura de empastamiento (°C)	Viscosidad Máxima (cP)	Viscosidad Mínima (cP)	Inestabilidad del gel (cP)	Viscosidad Final (cP)	Retrogradación (cP)	Facilidad cocción (min)
Guayabo	0	Crudos	74,5	2290,8	1633,3	657,5	2451,3	818,0	2,9
Hartón	0		75,0	2573,8	1374,3	1199,5	2222,8	848,5	2,0
Guayabo	3	76	75,6	2204,7	1642,7	562,0	2365,7	723,0	2,3
	30		80,0	734,2	665,7	68,5	832,2	166,5	4,1
	60		80,8	547,8	517,3	30,5	641,3	124,0	4,7
Hartón	3		74,5	2441,0	1731,5	709,5	2590,0	858,5	2,5
	30		81,5	1501,7	1345,2	156,5	1595,2	250,0	2,6
	60		82,2	1252,2	1093,2	159,0	1279,2	186,0	2,5
Guayabo	3	86	78,7	1435,35	1300,35	135,0	1671,4	236,0	2,3
	30		81,2	948,9	810,9	138,0	974,9	164,0	2,8
	60		81,9	777,1	660,1	117,0	836,6	176,5	2,7
Hartón	3		74,6	2451,0	1744,0	707,0	2568,0	824,0	2,1
	30		76,7	1027,5	817,0	210,5	981,0	164,0	3,0
	60		82,8	577,0	546,0	31,0	712,0	166,0	3,6
Guayabo	3	Ebullición	74,9	1253,9	1124,9	129,0	1257,4	132,5	5,6
	30		77,5	779,2	725,2	54,0	876,2	151,0	4,4
	60		58,7	929,8	794,8	135,0	1130,8	336,0	5,8
Hartón	3		76,3	1964,5	1698,5	266,0	2180,5	482,0	2,8
	30		59,3	983,9	778,9	205,0	1074,4	295,5	4,6
	60		56,5	1291,0	845,5	445,5	1156,0	310,5	4,2
Guayabo	3	Vapor	76,3	1997,3	1462,3	535,0	2058,3	596,0	2,4
	30		81,3	474,5	439,5	35,0	538,5	99,0	4,2
	60		60,9	925,9	606,9	319,0	796,9	190,0	3,2
Hartón	3		73,5	2100,7	1439,7	661,0	1969,7	530,0	2,2
	30		58,9	526,1	439,6	86,5	631,6	192,0	5,4
	60		57,1	582,0	405,0	177,0	578,0	173,0	4,0

Para cada uno de los parámetros se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en tres vías (Variedad, Tratamiento, Tiempo), para un nivel de confianza del 95%, encontrando que en todos los casos el P valor fue menor que 0,05, correspondientes a 0, para cada factor y sus interacciones, rechazándose la hipótesis nula, lo que indica que las medias de los parámetros no son iguales, de tal manera que al aceptar la hipótesis alterna, hay diferencias significativas en las muestras evaluadas, dándose por tanto cambios en función de la variedad, tiempo y tratamiento de cocción empleados (Anexo 5).

Los valores de la temperatura de inicio de la gelatinización para las muestras de las harinas crudas correspondientes a 75°C para el Hartón y 74,5°C para el Guayabo, fueron superiores a los obtenidos por el método del DSC, con 70,88°C y 70,7°C en Hartón y Guayabo respectivamente, estas diferencias pueden deberse a las condiciones propias de los métodos, como la concentración

de las soluciones, ya que para las curvas de formación de pasta la concentración estuvo entre 8 - 9% p/p y en la determinación por DSC fue del 20% p/p, así como el empleo de temperaturas y tiempo de realización de los análisis diferentes.

Al compararse las temperaturas de inicio del empastamiento de las harinas crudas de Hartón y Guayabo con las de harinas como las de banano verde, las segundas tuvieron un valor de 77°C (González y Pacheco-Delahaye, 2006), así mismo investigadores como Dufour^b *et al.*, 2008 encontraron para este parámetro valores de 75,7°C para Hartón y 73,6°C para Guayabo. Se ha reportado para plátanos de cocción que los valores de la temperatura de formación de pasta están entre 69,35°C y 73,82°C (Hoyos *et al.*, 2012), las diferencias presentadas con las muestras analizadas pueden radicar en las condiciones de procedencia, variaciones en los grados brix y época de cosecha de los frutos. Adicionalmente, los valores obtenidos resultaron ser mayores a los indicados para harina cruda de yuca con 63,35°C (Rodríguez^b *et al.*, 2006).

Con respecto a los tratamientos térmicos utilizados, la temperatura de formación de pasta presentó cambios, pues en los procesos de cocción en agua a 76°C y 86°C ésta tiende a aumentar con el tiempo de cocción en las harinas de ambos cultivares de plátano, e igualmente esto se presenta en el Guayabo tratado bajo condiciones de ebullición y vapor en tiempos de 3 y 30 minutos, de manera similar este comportamiento fue observado mediante el análisis por DSC. A los 60 minutos en las cocciones con agua a 96°C (ebullición) y vapor en Guayabo y en los tres tiempos evaluados de estos mismos tratamientos para Hartón, la temperatura de formación de pasta tendió a disminuir, presentando una mayor susceptibilidad el Hartón al tratamiento térmico, ya que estos bajos valores pueden estar relacionados con las condiciones propias de los tratamientos, en ebullición la transferencia de calor a las muestras es diferente por la presencia de burbujas de vapor, lo que no ocurre en los otros dos tratamientos en donde se utilizó agua y en el vapor, la temperatura del medio de cocción fue mucho mayor que en los tratamientos con agua, lo que pudo haber provocado un rápido hinchamiento de los gránulos de almidón y se dio inicio a la gelatinización a temperaturas más bajas, esto relacionado con los *k* de gelatinización mayores a mayor temperatura en el tratamiento térmico, como los obtenidos en las cocciones con agua. Además, si se tiene en cuenta el porcentaje de gelatinización luego de los tres minutos de cocción en los tratamientos con agua en ebullición y con vapor, el almidón se ha gelatinizado, por lo que la pequeña fracción sin gelatinizar se refleja en menores temperaturas de formación de pasta.

Al analizar el comportamiento de las viscosidades máxima y mínima, hubo una tendencia a disminuir por el efecto de la temperatura y el tiempo de cocción. En temperaturas por debajo de los 100°C y en ausencia de esfuerzo mecánico, los gránulos hinchados, ricos en amilopectina, mantienen su integridad, aunque esto depende del tipo de almidón. El incremento en la fracción en volumen de los gránulos de almidón en la suspensión conduce a un incremento en la viscosidad de la pasta. Si la temperatura es tal que la amilosa solubilizada es lenta para agregarse, la viscosidad de las pastas, en común con otra suspensión de partículas, está dominada por la fracción de volumen ocupada por los gránulos de almidón. En concentraciones mayores del 6% p/p para almidones de cereales, los gránulos gelatinizados llenan el volumen disponible produciendo un material viscoelástico, propiedades que están adicionalmente influenciadas por la deformabilidad del gránulo de almidón hinchado y por lo tanto la concentración de amilopectina en el gránulo. El hinchamiento del gránulo en la gelatinización claramente tiene un mayor impacto en la reología de pastas de almidón (Parker y Ring, 2001).

La tendencia a disminuir los valores en las viscosidades máxima y mínima presenta excepcionalidad para el tiempo de 60 minutos al efectuar cocción en agua a 96°C y con vapor, donde estos valores se incrementaron, una situación similar se presentó en harinas de maíz y en este caso se atribuyó este comportamiento a que el número de complejos amilosa-lípidos se promueve durante la gelatinización por lo que es de esperarse también un mayor número de complejos en muestras cocidas por 60 minutos con más almidón gelatinizado. El incremento en la viscosidad de las muestras con reposo podría deberse a la reorganización estructural que se

presenta por recristalización y recocido en estas muestras cocidas por más tiempo y con mayor cantidad de almidón gelatinizado y que sería mucho más marcado que en las muestras cocidas por menor tiempo (Mondragón, 2004). Aunque los plátanos son materias primas con un mínimo aporte de lípidos (0,1 a 0,2%), resultaría interesante identificar en las variedades estudiadas la cantidad de este componente o al menos establecer su presencia en el almidón que sea aislado para identificar la posible existencia del complejo lípido-amilosa.

La pérdida de la capacidad para desarrollar viscosidad también fue observada por Álvarez *et al.*, 2009, en donde se estudió la modificación del almidón en frutos cocidos en agua en ebullición de Dominico Hartón y Rollizo, en el que la disminución progresiva en la viscosidad máxima en las muestras se dio con mayor tiempo de cocción, así mismo en las curvas presentadas en este estudio, las temperaturas de empastamiento resultaron menores que la de los materiales crudos y con tres minutos de cocción.

Para harina de banano verde se indicó que la caída de la viscosidad con la formación de un pico fuertemente definido, como se observa también en las muestras crudas de los plátanos Hartón y Guayabo, es debido a que sus gránulos, poseen un mayor grado de gelatinización; además que los enlaces que predominan en el gránulo de almidón son débiles y se logran destruir con facilidad. El incremento progresivo de la viscosidad está relacionado con el poder de hinchamiento de los gránulos de almidón de la harina de banano verde, al igual que el decrecimiento de la viscosidad lo relaciona con la desintegración de los mismos. El pico alcanzado y la sucesiva caída brusca de la viscosidad, podría responder a las características particulares del poder de hinchamiento de los almidones de la harina de banano verde y la rápida desintegración de éstos (González y Pacheco-Delahaye, 2006), la caída brusca de la viscosidad se dio de forma notoria en las harinas del plátano Hartón, las que presentaron valores de poder de hinchamiento menores a las del Guayabo (Anexo 6).

En los tratamientos de cocción a 30 y 60 minutos con vapor para el Hartón, el valor de viscosidad máxima no presentó mayor variación, ya que la diferencia entre estas dos viscosidades no superó los 70 cP, lo que representaría un almidón estable en su espesamiento a los procesos de cocción, mientras que valores altos de viscosidad final, aquella que se alcanza cuando la pasta se enfría, indica almidones que no son estables a los procesos de enfriamiento, lo que debe tenerse en cuenta al momento de pensar en incorporar el almidón a algún producto que necesite enfriamiento durante su preparación (Hernández *et al.*, 2008), resultando posiblemente de mayor utilidad para productos que requieran refrigeración almidones presentes en harinas de Guayabo procedente de cocción en agua a 76°C y las harinas de Hartón obtenidas por agua a 86°C y con vapor por 30 y 60 minutos, por presentar los valores más bajos de viscosidad final, como se indicó en la tabla 13.

Las muestras de Guayabo presentaron los valores más bajos de retrogradación en comparación con las muestras de Hartón, dada su condición de presentar menor contenido de amilosa, esto podría sugerir una mayor estabilidad del almidón presente en estas harinas a procesos de calentamiento y enfriamiento, teniendo pastas menos alterables a esfuerzos mecánicos (Hernández *et al.*, 2008), aunque en ambos casos se dio una tendencia notoria a disminuir este parámetro en los tres tiempos evaluados para el tratamiento con agua a 76°C y a 86°C particularmente para el Hartón, mientras que esta misma situación se observó en ebullición y vapor, pero para los tiempos de 3 y 30 minutos, ya que en 60 minutos este valor aumentó, posiblemente en este tiempo ocurre un reacomodamiento estructural del polímero que provoca un aumento en la viscosidad.

En cuanto a la facilidad de cocción, ésta se relaciona con la velocidad de hinchamiento del gránulo de almidón y es el tiempo que tarda la suspensión en alcanzar la viscosidad máxima desde la temperatura de inicio de la gelatinización (Rodríguez^b *et al.*, 2006). Con base en los valores de tiempo obtenidos, éstos resultaron menores para la harina cruda y mayoría de harinas cocidas del Hartón, con base en estos resultados era de esperarse que las constantes de gelatinización (k)

fueran numéricamente mayores para este cultivar, situación que no se presentó, pues éstas fueron más bajas que las del Guayabo. Esto podría ser debido a la configuración de la amilopectina en el Hartón, que estaría produciendo que este polímero absorba suficiente agua de una manera rápida, pero sea más resistente a la ruptura, asociado a una mayor heterogeneidad en el tamaño de los gránulos.

Si se tiene en cuenta que la facilidad de cocción hace que una harina sea utilizable industrialmente, debido a que la demanda por energía es menor para lograr la gelatinización, se busca que este tiempo sea inferior a 5 min, tiempo estimado de cocción de otras fuentes de harinas como el trigo (Hoyos *et al.*, 2012), esta característica se presentó en las muestras crudas con valores de 2,9 min para el Guayabo y 2,0 min para el Hartón, los que a su vez de una manera más evidente tendieron a aumentar en el tratamiento en agua a 76°C, manteniéndose por debajo de los 5 minutos, esto podría resultar de interés si este tipo de harinas fueran a aprovecharse como materias primas en la elaboración de productos que requieran espesantes y bajo calentamiento en su elaboración, como salsas para aderezos.

Con respecto a la inestabilidad del gel, el cual está relacionado con la fragmentación mecánica, los almidones de la harina cruda de Guayabo fueron más inestables que los del Hartón, e igualmente pudo observarse con base en los resultados consignados en la tabla 13, que los valores de este parámetro disminuyen con el aumento de la temperatura del agua de cocción y con el tiempo del tratamiento, aunque en ebullición y en vapor a los 60 minutos se presenta un incremento de éste, según Hoyos *et al.*, 2012, a mayor inestabilidad mayor será la exposición al rompimiento del gel por causas mecánicas, debido a la fragilidad de destrucción de los gránulos que se manifiesta con la pérdida de viscosidad en el sistema, lo que depende del tamaño del gránulo. A mayor tamaño se destruyen más fácilmente, ya que son más susceptibles a la ruptura por las fuerzas térmicas o mecánicas aplicadas, e igualmente podría decirse, que por la gelatinización del almidón como consecuencia de los tratamientos térmicos, va a existir en el medio mayor proporción de gránulos rotos. En cuanto al aumento de la inestabilidad del gel para el tiempo de 60 minutos en agua en ebullición y en vapor, pudo darse por la presencia de algunos gránulos sin gelatinizar todavía presentes de menor tamaño, o por reordenamiento estructural de la amilosa y la amilopectina, asociado con el fenómeno de retrogradación.

4.2.4 Índices de absorción de agua (IAA), de solubilidad de agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH) en harinas obtenidas de plátanos cocidos

Para cada uno de estos parámetros se realizó una ANOVA (anexo 6) con el fin de establecer la existencia o no de diferencias en cada uno de éstos en función de la variedad, tratamiento y tiempo de cocción (3, 15, 30, 45 y 60 min), así como entre sus interacciones.

Para un 95% de confianza y con valores de P valor por encima de 0,05, las tendencias en IAA son similares para Guayabo y Hartón, es decir este parámetro no cambia en función de la variedad ($P_{\text{valor}} = 0,20$), siguiendo tendencias similares, pero sí presenta variaciones en función del tiempo y la temperatura, en ambos casos el P valor fue de 0, así como de la interacción tiempo – temperatura ($P_{\text{valor}} = 0,02$) e igualmente con una posible incidencia de la interacción variedad – temperatura, P valor 0,0488 ($< 0,05$). Esto puede apreciarse en la figura 43 en la que para ambas variedades el índice de absorción de agua tiende a aumentar cuando la temperatura es mayor, la que corresponde a cada uno de los tratamientos de cocción en los que se utiliza agua (los tres primeros puntos de la figura) y a presentar un valor alto en el tratamiento con vapor, considerándolo mejor de manera independiente.

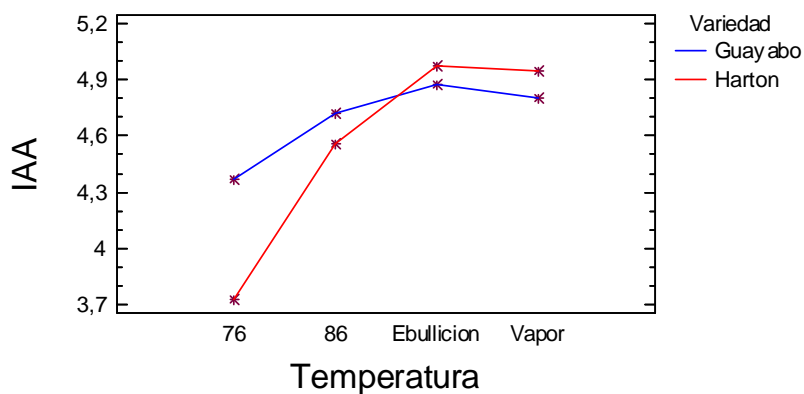


Figura 43. Gráfico de interacción para el índice de absorción de agua con relación a la variedad y el tratamiento de cocción

Teniendo en cuenta la influencia de la interacción tiempo – temperatura cuyo P valor fue de 0,018 ($< 0,05$), puede observarse en la figura 44 para el tratamiento en agua a 76°C como va aumentando el IAA a medida que transcurre el tiempo de cocción, con una disminución en el tiempo de 45 minutos, pero en este caso pudieron presentarse condiciones de experimentación que influyeron en un menor valor, ya que a los 60 minutos el valor se asemeja al del tiempo de 30 minutos, esta misma tendencia se sigue en el tratamiento con agua a 86°C con una leve disminución en el tiempo de 30 minutos y en ebullición y vapor después de los 15 minutos este parámetro tiende a mantenerse constante, en ambas variedades.

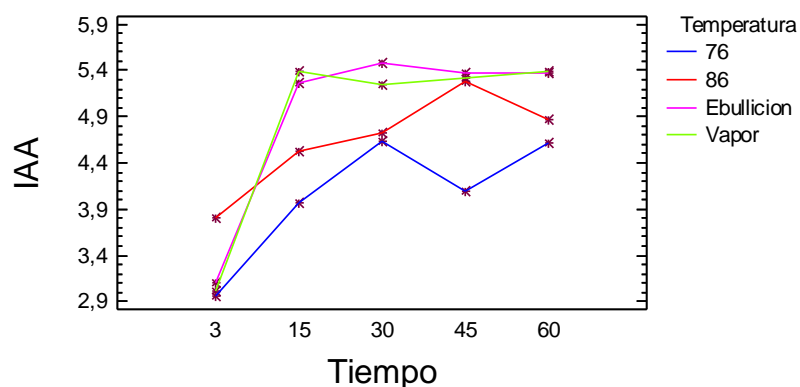


Figura 44. Gráfico de interacción para el índice de absorción de agua de manera consolidada para las variedades Hartón y Guayabo con relación al tratamiento de cocción y el tiempo

Como el índice de absorción de agua es una medida indirecta del grado de almidón gelatinizado por la cocción (Brousse *et al.*, 2012), como pudo establecerse con anterioridad, el porcentaje de almidón que es gelatinizado se incrementa con el tiempo de cocción en todos los tratamientos, y en la mayoría de los casos también lo hace el índice de absorción de agua. Con el calentamiento que sufre el almidón en los procesos de cocción, se podría dar la destrucción de complejos como el de

lípidos-amilosa, que interfiere con la absorción del agua, además los puentes de hidrógeno que se forman entre la amilosa y el agua, son también responsables de la absorción de agua y de la gelatinización del almidón (Brousse *et al.*, 2012).

Los índices de absorción de agua para las harinas crudas fueron de $3,52 \pm 0,2$ para Guayabo y $3,81 \pm 0,5$ para Hartón, en el estudio realizado por Jiménez, 2012, se reporta para las harinas provenientes de las variedades de plátano macho, manzano y cuadrado valores de $2,5 \pm 0,11$; $2,23 \pm 1,11$ y $3,18 \pm 1,02$ respectivamente, resultando mayores los valores de las variedades colombianas. En otros materiales biológicos como harinas de yuca precocidas sin someterlas a condiciones de reposo a baja temperatura, se presentaron valores de IAA de $9,92 \pm 0,04$, mayores que los del plátano, en este caso podría decirse que la diferencia está en función de la fuente botánica de las harinas.

Con respecto al comportamiento del índice de solubilidad en agua (ISA), está en función de los tres factores evaluados (anexo 6), pues los efectos Variedad, Tiempo y Temperatura, analizados independientemente presentaron el mismo P valor, igual a 0, por otro lado, la manera como interaccionan Variedad-Temperatura ($P_{\text{valor}} = 0$) y Tiempo-Temperatura ($P_{\text{valor}} = 0$), ambos con un P valor menor que 0,05, para un nivel de confianza del 95%, indica para cada factor y las interacciones mencionadas, que los valores de las medias del parámetro cambian.

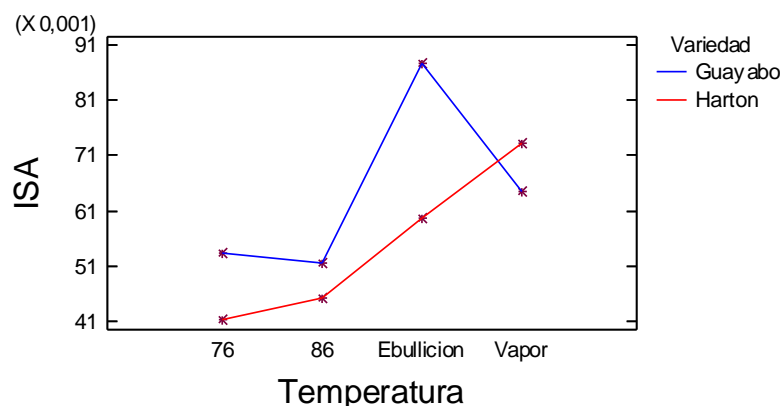


Figura 45. Gráfico de interacción para el índice de solubilidad en agua con relación a la variedad y el tratamiento de cocción

Con base en la figura anterior puede apreciarse una tendencia creciente en el comportamiento del índice de solubilidad en agua para el cultivar Hartón con respecto al aumento de la temperatura de acuerdo con el tratamiento de cocción en agua empleado, y si se analiza de forma independiente la cocción con vapor, el valor del ISA resulta superior al de los tratamientos con agua. En el caso del Guayabo se aprecia en los tres primeros puntos de la figura, una leve disminución en el ISA cuando se tienen temperaturas de 76°C y 86°C e igualmente como en el caso del Hartón, se observó el comportamiento para el tratamiento con vapor de manera separada, presentándose en este caso un valor menor al de ebullición.

El incremento presentado en el índice de solubilidad en agua de las harinas cocidas de Hartón y Guayabo (entre 86°C y ebullición) obtenidas por la cocción en agua a las temperaturas del estudio, puede estar dado por la exudación de amilosa debido al hinchamiento de los gránulos de almidón

(Hernández *et al.*, 2008), así como de otros compuestos que hacen parte de la estructura vegetal de los plátanos, ya que en este caso no se trabajó con almidones puros.

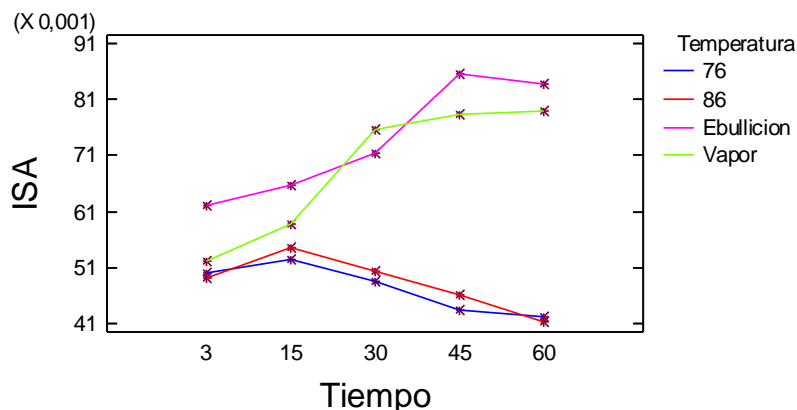


Figura 46. Gráfico de interacción para el índice de solubilidad en agua de manera consolidada para las variedades Hartón y Guayabo con relación al tratamiento de cocción y el tiempo.

En la figura 46 la tendencia en el incremento en el índice de solubilidad resultó de un consolidado de este parámetro en los cinco tiempos evaluados, al observarse de manera separada la incidencia del tiempo de cocción con respecto al tratamiento empleado, en los casos de ebullición y vapor, se da que en la medida que el tiempo aumenta también lo hace el ISA, pero en el caso de las cocciones en agua a 76°C y 86°C ocurre todo lo contrario.

Valores más altos de índice de solubilidad en agua, en comparación con los de la capacidad de absorción de agua, en el cual sus constituyentes solubles pueden ser disueltos en el agua, en función de la temperatura, a diferencia del nivel de absorción, puede ser debido a harinas con presencia de mayor cantidad de sólidos solubles como carbohidratos de bajo peso molecular, esto indicado en harinas de banano verde (González y Pacheco-Delahaye, 2006), pero con base en los datos obtenidos en la experimentación, ocurre la situación contraria en los tratamientos a 76°C y 86°C a partir de los 30 minutos de cocción, lo que podría estar dándose es que en estas condiciones no se facilita la solubilización de los sólidos especialmente los de bajo peso molecular, mientras que en condiciones de ebullición y por la acción del vapor, los tejidos quedan más expuestos por el mayor ablandamiento que presentan los cilindros de plátano favoreciendo la migración de este tipo de compuestos a medios como el agua cuando se preparan las suspensiones a partir de las harinas.

Si se tiene en cuenta que el índice de solubilidad indica el nivel de degradación de los polímeros contenidos en el almidón (Brousse *et al.*, 2012) como la amilosa y la amilopectina, también podría considerarse que en las harinas hay una mezcla con otros polímeros como la pectina, la que podría estar teniendo algún aporte en la fracción de sólidos de bajo peso molecular como consecuencia de procesos hidrolíticos a los que también se ve expuesta, en condiciones como ebullición y vapor al darse un mayor ablandamiento de los tejidos se facilitaría la exudación al medio de compuestos no amiláceos de bajo peso molecular.

Adicionalmente, la solubilidad en harina de plátano puede ir en aumento en función de la temperatura, esto debido a que posee mayor cantidad de sólidos solubles tales como carbohidratos de bajo peso molecular (González y Pacheco-Delahaye, 2006).

Los índices de solubilidad en agua para las harinas crudas fueron de $7,52\% \pm 0,014$ para Guayabo y $5,86\% \pm 0,004$ para Hartón, en el estudio realizado por Jiménez, 2012, se reporta para las harinas provenientes de las variedades de plátano macho, manzano y cuadrado valores de $5,6\% \pm 2,1$; $4,00 \pm 0,00$ y $7,00 \pm 1,7$ (Jiménez, 2012), teniendo semejanzas en el comportamiento en este parámetro el Hartón con la variedad de plátano macho y el Guayabo con la variedad cuadrado. En harina de yuca precocida sin ser sometida a reposo a bajas temperaturas, se obtuvo un valor de ISA de $19,22 \pm 0,3$, mucho mayor que para plátano y así como en el caso del IAA se observa la influencia del tipo y origen del almidón en estas propiedades.

En cuanto al poder de hinchamiento, en el análisis de varianza realizado (anexo 6), los P valor de los efectos Variedad ($P_{\text{valor}} = 0,03$), Tiempo ($P_{\text{valor}} = 0,00$) y Temperatura ($P_{\text{valor}} = 0,00$), resultaron menores que 0,05, para un nivel de confianza del 95%, rechazando la hipótesis nula, por lo que existen variaciones en el poder de hinchamiento (PH) influenciadas de manera independiente por la variedad, tiempo y temperatura, así como por la interacción tiempo – temperatura ($P_{\text{valor}} = 0,02$).

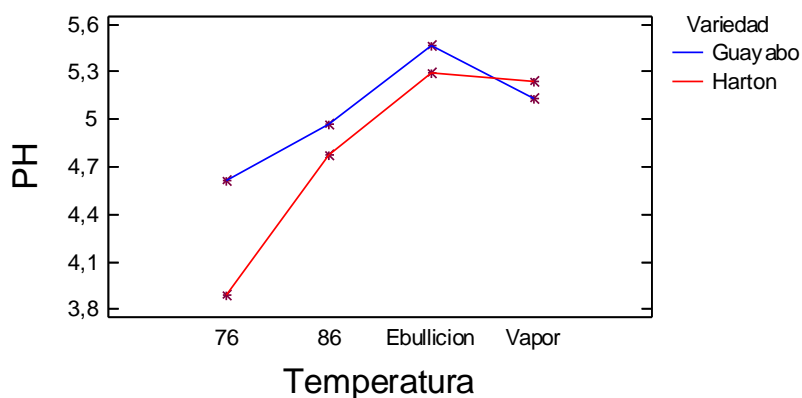


Figura 47. Gráfico de interacción para el poder de hinchamiento con relación a la variedad y el tratamiento de cocción.

En los tratamientos de cocción en agua (76°C, 86°C y 96°C -ebullición-) en la medida que la temperatura aumenta también lo hace el poder de hinchamiento, así como en los casos del IAA e ISA la tendencia de este parámetro para tratamientos como vapor requeriría analizarse de forma independiente y de esta manera poder evidenciar si la tendencia bajo estas condiciones es similar a la cocción donde el medio es el agua líquida, aunque con este tratamiento los valores de PH también son altos como en el caso del agua en ebullición. Los valores de poder de hinchamiento más bajos para el Hartón en condiciones de 76°C pueden estar asociados a una condición que indica que los almidones con altas temperaturas de gelatinización son resistentes al hinchamiento a condiciones de temperatura inferiores a 70°C (temperatura de preparación de la suspensión) (Hernández, *et al.*, 2008), en este caso la asociación que podría establecerse es con base en los intervalos de gelatinización (Ig) los que resultaron mayores para el Hartón especialmente en el tratamiento en agua a 76°C.

Con respecto al poder de hinchamiento de los almidones, se menciona que ésta es una propiedad de su contenido de amilopectina, siendo la amilosa un diluyente e inhibidor del hinchamiento, (Hernández, *et al.*, 2008, Bou *et al.*, 2006), como el Hartón presentó un valor más alto que el Guayabo en amilosa, ésta podría estar inhibiendo el hinchamiento de sus gránulos, por lo que resultaron más bajos sus valores de poder de hinchamiento (anexo 6).

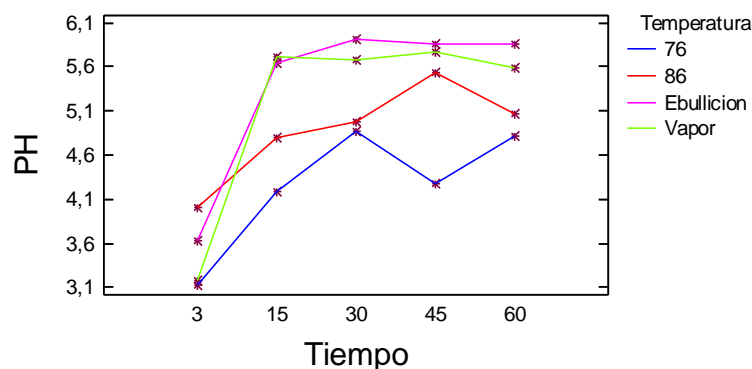


Figura 48. Gráfico de interacción para el poder de hinchamiento de manera consolidada para las variedades Hartón y Guayabo con relación al tratamiento de cocción y el tiempo.

En la figura 48 se aprecia que los valores del poder de hinchamiento resultaron ser más bajos para los tratamientos de cocción con menores temperaturas como las de 76°C y 86°C, con una tendencia creciente a medida que avanza el tiempo de cocción de los cilindros de plátano (anexo 6), e igualmente la tendencia del poder de hinchamiento a aumentar con la acción de la temperatura estaría dada por la modificación que sufren los almidones por acción directa del calentamiento.

Es importante también tener en cuenta que el poder hinchamiento del almidón está influenciado por muchos factores como son la presencia de lípidos, de grupos fosfato cargados negativamente, tamaños del gránulo y poro, así como superficie específica del área (González y Pacheco-Delahaye, 2006).

En cuanto a harinas u hojuelas secas precocidas obtenidas a partir de materias primas amiláceas generalmente se deben rehidratar para su utilización, por lo cual se requiere que estén constituidas de estructuras porosas y que conserven la habilidad de absorción e hinchamiento al contacto con agua. En el caso específico de hojuelas de papa deshidratadas para la elaboración de puré, se necesita que en su proceso de manufactura se minimice la cantidad de almidón liberado desde el interior del tejido del parénquima, debido a que éste afecta directamente la textura pastosa o pegajosa del producto reconstituido (Rodríguez *et al.*, 2006), igualmente, tubérculos como la papa presentan un mayor contenido de grupos fosfato cargados negativamente, éste es un factor determinante del poder de hinchamiento, ya que le proporciona a la papa su gran habilidad de enlazarse con un mayor número de moléculas de agua (González y Pacheco-Delahaye, 2006). Con base en la tabla de composición de alimentos colombianos, el plátano Hartón contiene 11 mg de fósforo por cada 100 g de parte comestible, mientras que la papa común sin cáscara presenta 26 mg de fósforo por cada 100 g de parte comestible, aunque la cantidad de este mineral en plátano es menor, su presencia podría estar jugando un rol en las condiciones de interacción de los componentes de esta matriz alimentaria con el agua.

4.3 FASE EXPERIMENTAL II. PREPARACIÓN DE MASAS Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS VISCOELÁSTICAS

4.3.1 Parámetros reológicos en la formación de masas

Se estableció la variación de los módulos elástico y viscoso con respecto a la frecuencia en todos los tratamientos en los que fue posible la formación de masa (anexo 7), en forma general en todas

las masas primó el comportamiento elástico como puede observarse de manera representativa en la figura 49, además los valores de los módulos disminuyen cuando el contenido de humedad de las masas es mayor.

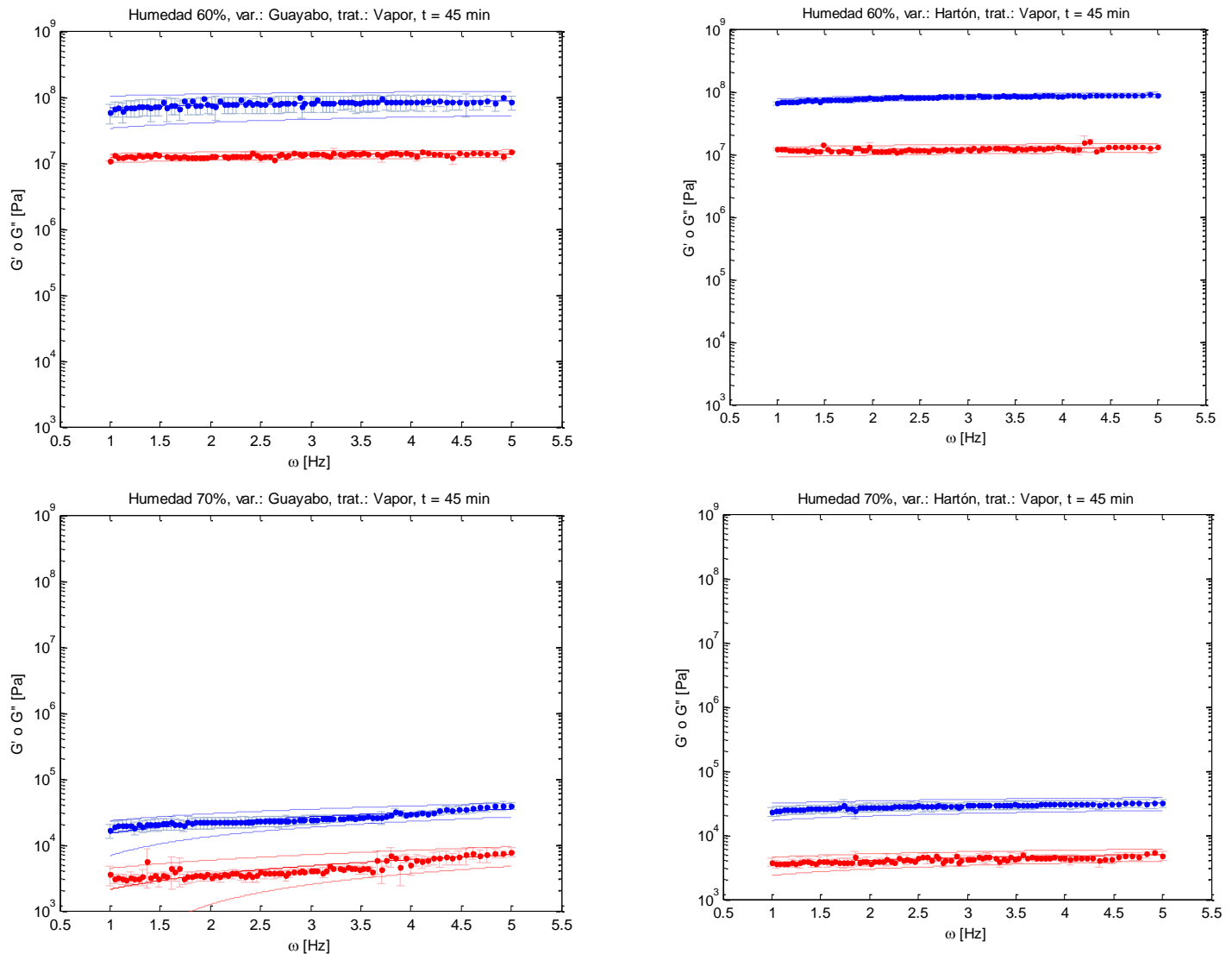


Figura 49. Comportamiento de los módulos elástico - G' - (color azul) y viscoso G'' (color rojo) para masas obtenidas de harinas cocidas en vapor durante 45 minutos, provenientes de plátanos Hartón y Guayabo con contenidos de humedad del 60 y 70%

Teniendo en cuenta que los módulos elástico y viscoso tienden a aumentar a medida que se hace mayor la frecuencia y con el fin de establecer un comparativo de los parámetros reológicos de las masas obtenidas, se definió una frecuencia fija correspondiente a 2 Hz, alrededor de la cual lograba apreciarse menos variabilidad de la información, ya que hubo mayores fluctuaciones en las frecuencias iniciales y finales de las pruebas.

Tabla 14. Tangentes de pérdida ($\tan \delta$) para masas de Guayabo y Hartón con contenidos de humedad del 60 y 70%, evaluadas a 2 Hz.

Tratamiento	Tiempo	60% de Humedad		70% de Humedad	
		Guayabo	Hartón	Guayabo	Hartón
76	3	0,2 ± 0,06	0,24 ± 0,00	***	***
	15	***	0,15 ± 0,01	0,13 ± 0,01	***
	30	***	***	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,01
	45	***	***	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01
	60	***	***	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01
86	3	0,17 ± 0,05	0,17 ± 0,05	***	***
	15	***	***	0,14 ± 0,00	0,13 ± 0,01
	30	***	***	0,13 ± 0,01	***
	45	***	***	0,13 ± 0,00	***
	60	***	***	0,14 ± 0,01	***
Ebullición	3	***	0,17 ± 0,02	***	***
	15	0,13 ± 0,00	***	0,14 ± 0,00	***
	30	***	***	0,15 ± 0,00	0,14 ± 0,01
	45	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,16 ± 0,00	0,15 ± 0,02
	60	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,15 ± 0,02	0,14 ± 0,01
Vapor	3	0,18 ± 0,00	0,18 ± 0,01	***	***
	15	***	***	0,14 ± 0,01	0,13 ± 0,02
	30	***	***	0,13 ± 0,02	0,15 ± 0,00
	45	0,14 ± 0,01	0,14 ± 0,00	0,15 ± 0,03	0,13 ± 0,02
	60	0,14 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,14 ± 0,01

*** No se obtuvieron masas en estos tratamientos.

Los valores de $\tan \delta$ para las masas de ambas variedades y en los dos contenidos de humedad evaluados, estuvieron entre 0,24 y 0, indicando con esto materiales con comportamiento más elástico que viscoso, condiciones que también se han observado en masas obtenidas de harinas de maíz nixtamalizado con $\tan \delta$ de 0,33 y 0,26 (Escalante *et al.*, 2011).

Considerando la información registrada en la tabla 14, en las masas preparadas con un contenido de humedad del 60% y en las que se utilizaron harinas provenientes de tratamientos de cocción con agua en ebullición, se aprecia que el aumento en el tiempo del proceso incide en la disminución de este parámetro. Con respecto a los módulos viscoso, elástico y complejo de las masas con 60 y 70% de humedad provenientes de Guayabo y Hartón, en las tablas 15 y 16 se presentan los valores obtenidos.

Tabla 15. Módulos viscoso, elástico y complejo para masas obtenidas de harinas cocidas de Guayabo y Hartón con un contenido de humedad del 60%, evaluados a 2 Hz.

Tratamiento	GUAYABO				HARTÓN		
	Tiempo (min)	Módulo Viscoso (Pa)	Módulo Elástico (Pa)	Módulo Complejo (Pa)	Módulo Viscoso (Pa)	Módulo Elástico (Pa)	Módulo Complejo (Pa)
76	3	$2,22 \times 10^7 \pm 3,89 \times 10^6$	$1,10 \times 10^8 \pm 1,44 \times 10^7$	$1,13 \times 10^8 \pm 1,34 \times 10^7$	$2,29 \times 10^7 \pm 0$	$9,39 \times 10^7 \pm 0$	$9,67 \times 10^7 \pm 0$
	15	***	***	***	$2,37 \times 10^7 \pm 3,25 \times 10^5$	$1,58 \times 10^8 \pm 9,26 \times 10^6$	$1,59 \times 10^8 \pm 9,19 \times 10^6$
86	3	$1,9 \times 10^7 \pm 1,48 \times 10^6$	$1,3 \times 10^8 \pm 2 \times 10^7$	$1,3 \times 10^8 \pm 2 \times 10^7$	$2,13 \times 10^7 \pm 4,29 \times 10^6$	$1,25 \times 10^8 \pm 1,78 \times 10^7$	$1,27 \times 10^8 \pm 1,73 \times 10^7$
Ebullición	3	***	***	***	$2,31 \times 10^7 \pm 3,60 \times 10^6$	$1,26 \times 10^8 \pm 1,81 \times 10^7$	$1,28 \times 10^8 \pm 1,84 \times 10^7$
	15	$9,64 \times 10^3 \pm 0$	$7,50 \times 10^4 \pm 0$	$7,56 \times 10^7 \pm 0$	***	***	***
	45	$7,40 \times 10^3 \pm 7,97 \times 10^2$	$5,28 \times 10^7 \pm 5,59 \times 10^6$	$5,33 \times 10^7 \pm 5,57 \times 10^6$	$7,32 \times 10^3 \pm 0$	$5,89 \times 10^7 \pm 0$	$5,94 \times 10^7 \pm 0$
	60	$7,13 \times 10^3 \pm 1,33 \times 10^3$	$5,08 \times 10^7 \pm 1,43 \times 10^7$	$5,13 \times 10^7 \pm 1,44 \times 10^7$	$1,05 \times 10^4 \pm 1,22 \times 10^3$	$8,16 \times 10^7 \pm 5,94 \times 10^6$	$8,23 \times 10^7 \pm 6,01 \times 10^6$
Vapor	3	$1,75 \times 10^7 \pm 3,68 \times 10^6$	$9,63 \times 10^7 \pm 2,11 \times 10^7$	$9,79 \times 10^4 \pm 2,14 \times 10^4$	$2,00 \times 10^7 \pm 2,77 \times 10^6$	$1,11 \times 10^8 \pm 1,20 \times 10^7$	$1,13 \times 10^8 \pm 1,24 \times 10^7$
	45	$1,24 \times 10^7 \pm 1,44 \times 10^6$	$8,72 \times 10^7 \pm 6,82 \times 10^6$	$8,81 \times 10^7 \pm 6,96 \times 10^6$	$1,10 \times 10^7 \pm 9,17 \times 10^5$	$7,81 \times 10^7 \pm 4,58 \times 10^6$	$7,89 \times 10^7 \pm 4,66 \times 10^6$
	60	$1,16 \times 10^7 \pm 1,03 \times 10^6$	$8,61 \times 10^7 \pm 1,46 \times 10^7$	$8,69 \times 10^7 \pm 1,46 \times 10^7$	$7,36 \times 10^6 \pm 1,24 \times 10^6$	$6,64 \times 10^7 \pm 1,06 \times 10^7$	$6,73 \times 10^7 \pm 1,07 \times 10^7$

*** No se obtuvieron masas en estos tratamientos.

Tabla 16. Módulos viscoso, elástico y complejo para masas obtenidas de harinas cocidas de Guayabo y Hartón con un contenido de humedad del 70%, evaluados a 2 Hz.

Tratamiento	Tiempo (min)	GUAYABO			HARTÓN		
		Módulo Viscoso (Pa)	Módulo Elástico (Pa)	Módulo Complejo (Pa)	Módulo Viscoso (Pa)	Módulo Elástico (Pa)	Módulo Complejo (Pa)
76	15	$6,59 \times 10^3 \pm 6,96 \times 10^2$	$5,13 \times 10^4 \pm 1,16 \times 10^3$	$5,17 \times 10^4 \pm 1,24 \times 10^3$	***	***	***
	30	$7,28 \times 10^3 \pm 1,09 \times 10^3$	$5,93 \times 10^4 \pm 8,38 \times 10^3$	$5,98 \times 10^4 \pm 8,44 \times 10^3$	$5,74 \times 10^3 \pm 81,3$	$5,02 \times 10^4 \pm 1,82 \times 10^3$	$5,05 \times 10^4 \pm 1,80 \times 10^3$
	45	$6,74 \times 10^3 \pm 1,20 \times 10^3$	$5,72 \times 10^4 \pm 3,61 \times 10^3$	$5,76 \times 10^4 \pm 3,72 \times 10^3$	$5,64 \times 10^3 \pm 7,47 \times 10^2$	$4,53 \times 10^4 \pm 2,07 \times 10^3$	$4,56 \times 10^4 \pm 2,12 \times 10^3$
	60	$6,17 \times 10^3 \pm 9,98 \times 10^2$	$5,17 \times 10^4 \pm 5,90 \times 10^3$	$5,21 \times 10^4 \pm 5,98 \times 10^3$	$4,88 \times 10^3 \pm 2,99 \times 10^2$	$4,18 \times 10^4 \pm 1,71 \times 10^3$	$4,21 \times 10^4 \pm 1,72 \times 10^3$
86	15	$7,80 \times 10^3 \pm 1,42 \times 10^3$	$5,59 \times 10^4 \pm 9,23 \times 10^3$	$5,64 \times 10^4 \pm 9,34 \times 10^3$	$6,44 \times 10^3 \pm 2,54 \times 10^2$	$5,03 \times 10^4 \pm 4,37 \times 10^3$	$5,07 \times 10^4 \pm 4,37 \times 10^3$
	30	$8,01 \times 10^3 \pm 8,08 \times 10^2$	$6,11 \times 10^4 \pm 7,42 \times 10^3$	$6,16 \times 10^4 \pm 7,46 \times 10^3$	***	***	***
	45	$7,69 \times 10^3 \pm 8,14 \times 10^2$	$5,81 \times 10^4 \pm 5,75 \times 10^3$	$5,86 \times 10^4 \pm 5,80 \times 10^3$	***	***	***
	60	$7,24 \times 10^3 \pm 9,13 \times 10^2$	$5,14 \times 10^4 \pm 5,44 \times 10^3$	$5,19 \times 10^4 \pm 5,51 \times 10^3$	***	***	***
Ebullición	15	$5,68 \times 10^3 \pm 1,25 \times 10^3$	$3,95 \times 10^4 \pm 7,81 \times 10^3$	$3,99 \times 10^4 \pm 7,91 \times 10^3$	***	***	***
	30	$5,67 \times 10^3 \pm 1,13 \times 10^3$	$3,85 \times 10^4 \pm 7,49 \times 10^3$	$3,90 \times 10^4 \pm 7,58 \times 10^3$	$7,17 \times 10^3 \pm 1,36 \times 10^3$	$5,16 \times 10^4 \pm 7,19 \times 10^3$	$5,21 \times 10^4 \pm 7,30 \times 10^3$
	45	$4,32 \times 10^3 \pm 9,06 \times 10^2$	$2,73 \times 10^4 \pm 5,70 \times 10^3$	$2,76 \times 10^4 \pm 5,77 \times 10^3$	$8,21 \times 10^3 \pm 1,49 \times 10^3$	$5,41 \times 10^4 \pm 4,47 \times 10^3$	$5,47 \times 10^4 \pm 4,64 \times 10^3$
	60	$3,40 \times 10^3 \pm 3,13 \times 10^2$	$2,36 \times 10^4 \pm 5,40 \times 10^3$	$2,38 \times 10^4 \pm 5,39 \times 10^3$	$5,96 \times 10^3 \pm 5,75 \times 10^2$	$4,38 \times 10^4 \pm 6,71 \times 10^3$	$4,42 \times 10^4 \pm 6,73 \times 10^3$
Vapor	15	$4,99 \times 10^3 \pm 1,25 \times 10^3$	$3,65 \times 10^4 \pm 7,97 \times 10^3$	$3,69 \times 10^4 \pm 8,07 \times 10^3$	$5,70 \times 10^3 \pm 1,45 \times 10^3$	$4,21 \times 10^4 \pm 4,22 \times 10^3$	$4,25 \times 10^4 \pm 4,36 \times 10^3$
	30	$3,19 \times 10^3 \pm 2,79 \times 10^2$	$2,43 \times 10^4 \pm 3,21 \times 10^3$	$2,45 \times 10^4 \pm 3,15 \times 10^3$	$3,25 \times 10^3 \pm 5,53 \times 10^2$	$2,23 \times 10^4 \pm 4,03 \times 10^3$	$2,26 \times 10^4 \pm 4,07 \times 10^3$
	45	$3,21 \times 10^3 \pm 4,43 \times 10^2$	$2,18 \times 10^4 \pm 4,19 \times 10^3$	$2,20 \times 10^4 \pm 4,17 \times 10^3$	$3,60 \times 10^3 \pm 2,97 \times 10^2$	$2,71 \times 10^4 \pm 3,99 \times 10^3$	$2,73 \times 10^4 \pm 3,97 \times 10^3$
	60	$3,74 \times 10^3 \pm 2,39 \times 10^2$	$2,51 \times 10^4 \pm 3,43 \times 10^3$	$2,53 \times 10^4 \pm 3,42 \times 10^3$	$3,24 \times 10^3 \pm 5,59 \times 10^2$	$2,33 \times 10^4 \pm 5,74 \times 10^3$	$2,35 \times 10^4 \pm 5,76 \times 10^3$

*** No se obtuvieron masas en estos tratamientos.

En las masas elaboradas con un 60% de humedad el módulo viscoso en los tratamientos con agua en ebullición y con vapor tiende a disminuir a través del tiempo de cocción. Con respecto al módulo elástico las harinas procesadas bajo condiciones de ebullición, no generaron masas en las que se aprecie para este módulo una clara tendencia, ya que en ambos casos se dio fluctuación, mientras que en el tratamiento con vapor, el módulo elástico disminuye con el tiempo de proceso. En cuanto al módulo complejo podría indicarse que éste tiende a disminuir en los tratamientos en ebullición y con vapor, aunque en las masas de Hartón se presentó un ligero aumento en la cocción en agua a 76°C a través del tiempo.

Con base en los resultados de la tabla 16, puede observarse que fue posible obtener un mayor número de masas cuando se hidrataron las harinas hasta una humedad del 70%. Con respecto a los módulos, el viscoso tendió a mantenerse estable con algunas variaciones entre los tiempos de cocción, aunque en las masas provenientes del Guayabo obtenidas de harinas tratadas por cocción en agua a 86°C y 96°C, se apreció una leve disminución. Los módulos elástico y complejo tendieron a presentarse sin mayores fluctuaciones, con una pequeña disminución en los tratamientos con agua a 96°C (ebullición) y vapor en las masas de Guayabo.

De acuerdo con lo observado en las tablas 15 y 16 que relacionan las propiedades reológicas de las masas, en todos los casos los módulos elástico y complejo resultaron mayores que el módulo viscoso, obteniéndose los valores más altos de los módulos en las masas elaboradas con un contenido final de humedad del 60%, de acuerdo con esto, las masas obtenidas tuvieron un comportamiento más elástico que viscoso, lo que igualmente se apoya con los bajos valores obtenidos de las tangentes de pérdida, lo que indica la presencia de materiales altamente estructurados. Este comportamiento también ha sido observado en masas de maíz nixtamalizado (Escalante *et al.*, 2011) y en purés de papa dulce utilizados como base en alimentos para bebés, en donde el módulo elástico fue mucho mayor que el viscoso en todos los valores de frecuencia estudiados (Ahmed y Ramaswamy, 2006).

La disminución de los valores de los parámetros evaluados con el contenido de humedad, indica que la pérdida de fuerza es necesaria para formar masas que contienen alta cantidad de agua, de hecho muestras de masas de harina de trigo con bajo contenido de humedad han mostrado altos valores de los módulos G' y G'' , mientras que las que tienen alta cantidad de agua, han registrado valores más bajos de estos parámetros, por lo que un incremento en el contenido de agua tiene efectos plastificantes, en donde este componente puede comportarse como un lubricante mejorando el fenómeno de relajación (Mastromatteo *et al.*, 2013).

Un producto tradicional para la elaboración de masas en el que el contenido de almidón juega un rol de gran importancia es el maíz, con base en esto, se ha definido a la masa como una mezcla constituida por los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) mezclados con gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, gránulos intactos, partes de endospermo y lípidos. Todos estos componentes forman una malla compleja heterogénea dentro de una fase acuosa continua (Bello *et al.*, 2002), estas características también se presentaron en las masas elaboradas a partir de harinas de plátano, en las que a diferencia de las de maíz, no habría presencia de endospermo y la fracción de lípidos resultaría menor, el contenido de humedad también tendría una incidencia en las características de las masas, igualmente Bello *et al.*, 2002, han indicado que la reasociación de la amilosa y amilopectina, que depende del tiempo y la temperatura, modifica constantemente el contenido total de agua y su distribución dentro de esta matriz.

En la elaboración de masas panarias, el agua es un ingrediente esencial, de hecho es necesaria para formar el gluten y darle a la masa consistencia. De manera particular, la consistencia depende claramente de la cantidad de agua usada en su manufactura. El agua adicionada a harinas como la del trigo cumple funciones como: disolver las moléculas solubles, activar enzimas, provocar la

formación de nuevos enlaces entre las macromoléculas de la harina y alterar las propiedades reológicas de las masas. Variando la cantidad de agua se puede modificar la microestructura de la masa, por lo tanto se considera que el agua juega un rol muy importante en las propiedades viscoelásticas de las masas debido a su influencia en el desarrollo en la red proteica del gluten (Mastromatteo *et al.*, 2013). Pese a que el plátano no contiene gluten, si fue evidente la importancia de la presencia de agua en la formación de masas, ya que en este caso las interacciones se dan básicamente con el almidón presente. En estudios realizados por Létang *et al.*, 1999, citados por Rodríguez^a *et al.*, 2005, cuando se aplicaron pruebas dinámicas a masas de trigo a una frecuencia de 1 Hz, verificaron que el almidón presente en la masa incrementó la rigidez del material, así mismo un incremento del contenido de agua en un rango de 40 a 45% disminuyó los módulos dinámicos de la masa sin afectar la tangente del ángulo de pérdida o fase, la cual se tomó como un indicador de la organización estructural del material.

Un aspecto en común en la preparación de las masas con los contenidos de humedad del 60% y 70%, es que lograron obtenerse a partir de harinas procedentes de tiempos de cocción de 45 y 60 minutos, correspondiente a los tratamientos de agua a 96°C (ebullición) y vapor, lo que se ha asociado al fenómeno de la gelatinización, en el cual ocurre una dispersión parcial de gránulos hinchados dentro de la matriz, los que actúan como un pegamento que mantiene unidas las partículas de masa. Mucho almidón gelatinizado (debido a un cocimiento excesivo) produce una masa pegajosa que es difícil de manejar, aunque en estos casos con el tiempo máximo de 60 minutos no ocurrió. Por otro lado, poco cocimiento produce una masa sin cohesividad, situación presentada en masas con un contenido de humedad del 70% y preparadas con harinas obtenidas de plátanos Hartón y Guayabo con 3 minutos de cocción (Bello *et al.*, 2002). Con base en las masas que pudieron formarse, desde la percepción sensorial de su textura podría decirse que las masas ofrecieron una buena pegajosidad ya que en su manipulación no había adhesión del material a las superficies en contacto.

Cuanto más daño se dé en el almidón, dado básicamente por las condiciones de gelatinización, la harina tenderá a absorber una mayor cantidad de agua, reflejándose en el rendimiento de la masa. Se ha reportado una mayor consistencia de la masa durante la gelatinización, seguido de un período de calentamiento, los gránulos, que contendrían principalmente amilopectina, se rompen y colapsan en la matriz de amilosa formando un gel (Salvador *et al.*, 2006).

Las masas de materiales ricos en almidón, como cereales, raíces o tubérculos, pueden considerarse como dispersiones de almidón gelatinizado constituidas por gránulos hinchados y fragmentos granulares dispersos en una matriz biopolimérica continua. El objetivo de cualquier proceso para la obtención de harinas instantáneas es mantener el almidón, que sale del tejido celular, tan bajo como sea posible para evitar una textura pegajosa de los productos reconstituidos con la harina, tales como masas o purés (Rodríguez^c *et al.*, 2007), situación presente en las masas que pudieron obtenerse a partir de harinas cocidas de Hartón y Guayabo, en las que se facilitó su manipulación.

Por otro lado, a partir de la información obtenida del análisis realizado para las masas en una frecuencia de 2 Hz, se buscó establecer una relación entre el módulo elástico y propiedades fisicoquímicas como el índice de absorción de agua (IAA) y el poder de hinchamiento (PH) como se muestra en las figuras 50 y 51, así como inferir una relación con la firmeza relativa como se muestra en las figuras 52 y 53.

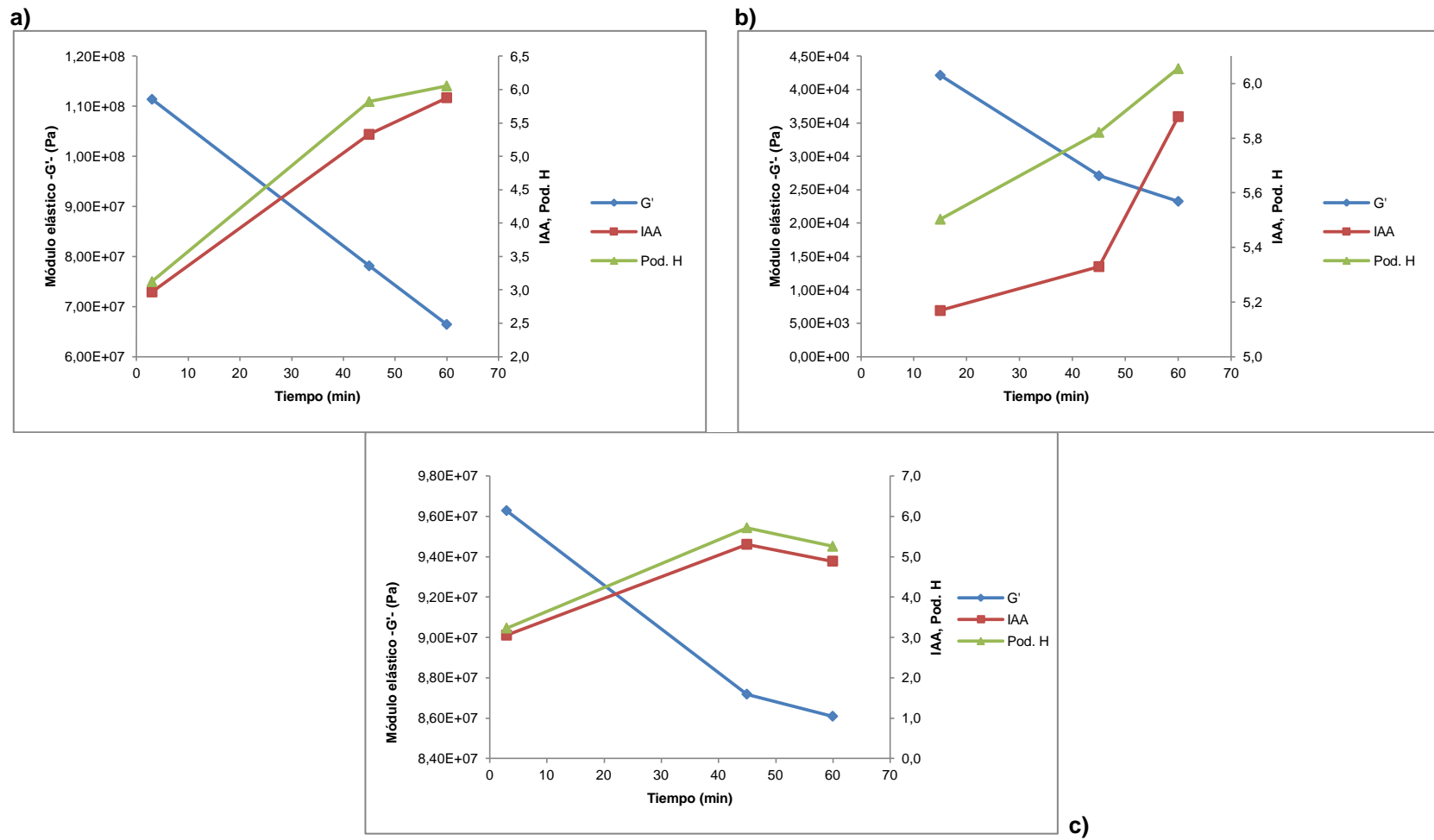


Figura 50. Comportamientos de módulo elástico (G'), índice de absorción de agua (IAA), poder de hinchamiento (Pod. H) con respecto al tiempo para masas obtenidas de harinas procesadas por cocción con vapor. a) Masa de Hartón con 60% de humedad, b) Masa de Hartón con 70% de humedad, c) Masa de Guayabo con 60% de humedad

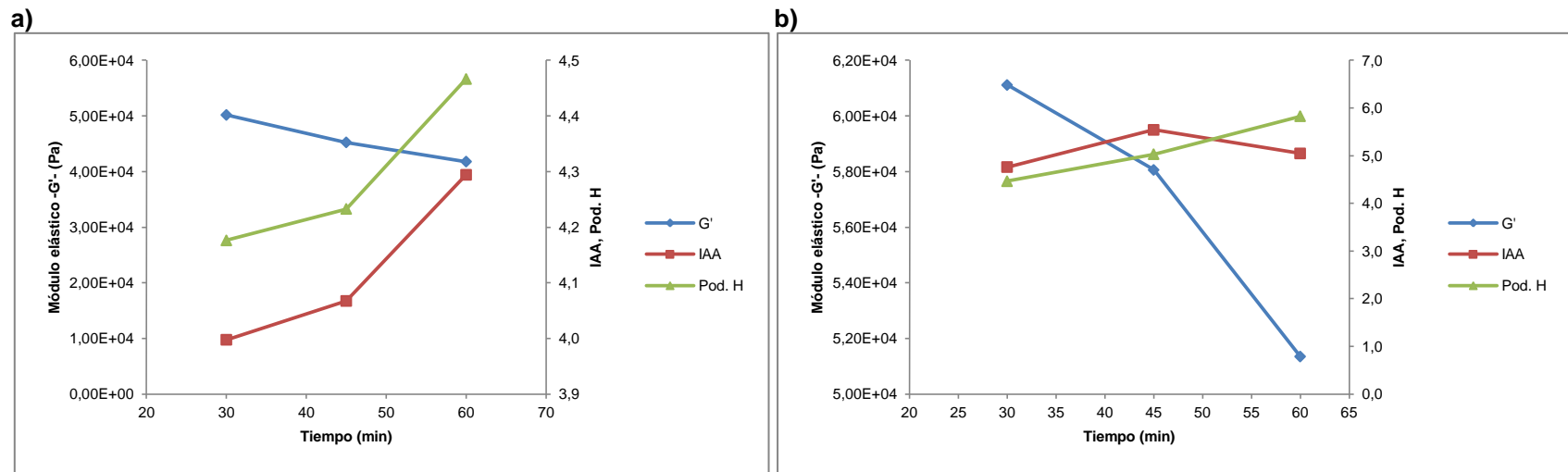
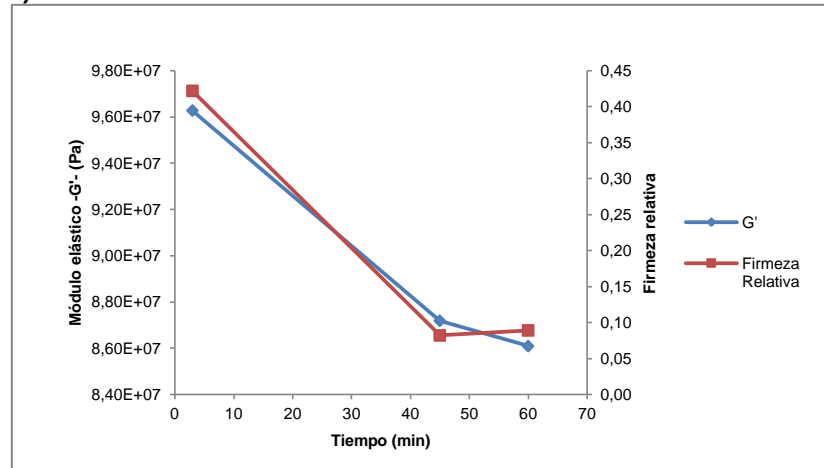
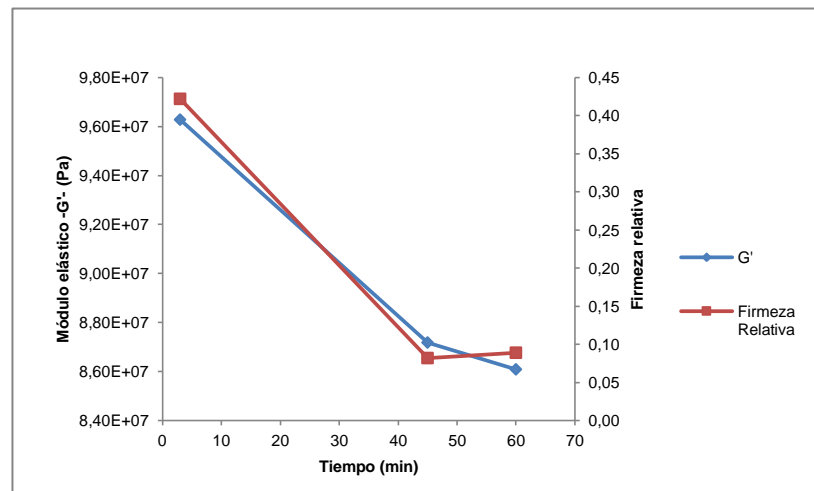
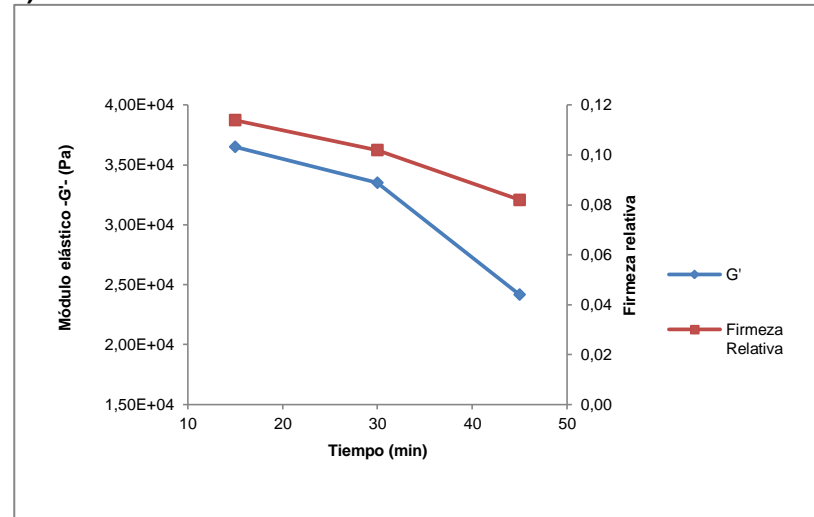


Figura 51. Comportamientos de módulo elástico (G'), índice de absorción de agua (IAA), poder de hinchamiento (Pod. H) con respecto al tiempo para a) Masa de Hartón con 70% de humedad proveniente de harina procesada por cocción en agua a 76°C y b) Masa de Guayabo con 70% de humedad proveniente de harina procesada por cocción en agua a 86°C

a)



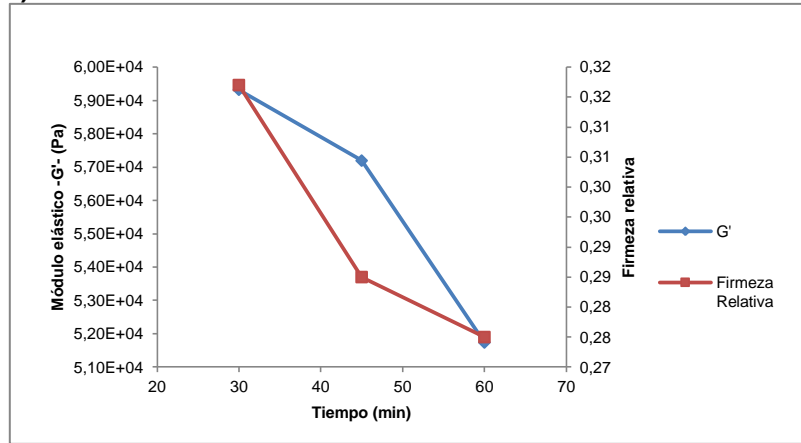
b)



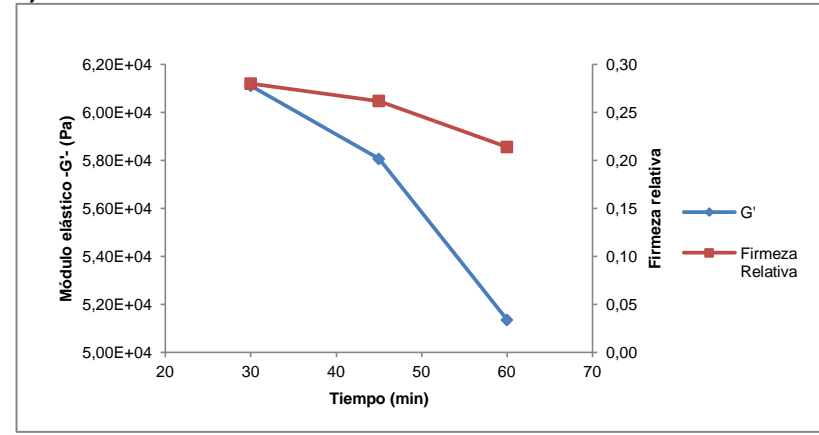
c)

Figura 52. Comportamientos de módulo elástico (G') y firmeza relativa con respecto al tiempo para masas y plátanos procesados por cocción con vapor. a) Masa de Guayabo con 60% de humedad, b) Masa de Guayabo con 70% de humedad, c) Masa de Hartón con 60% de humedad

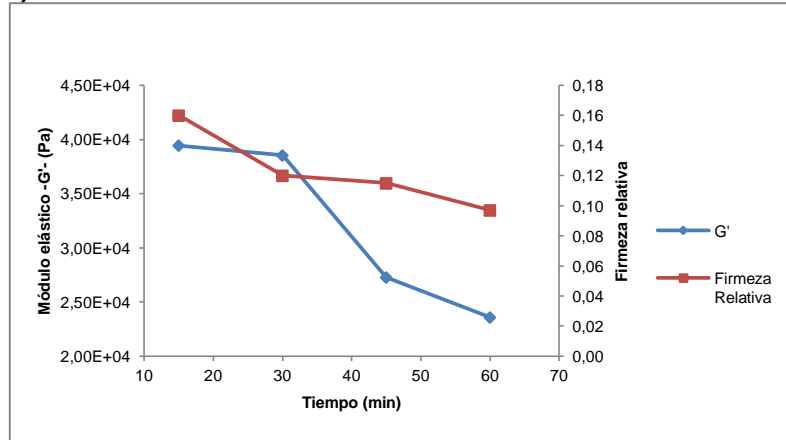
a)



b)



c)



d)

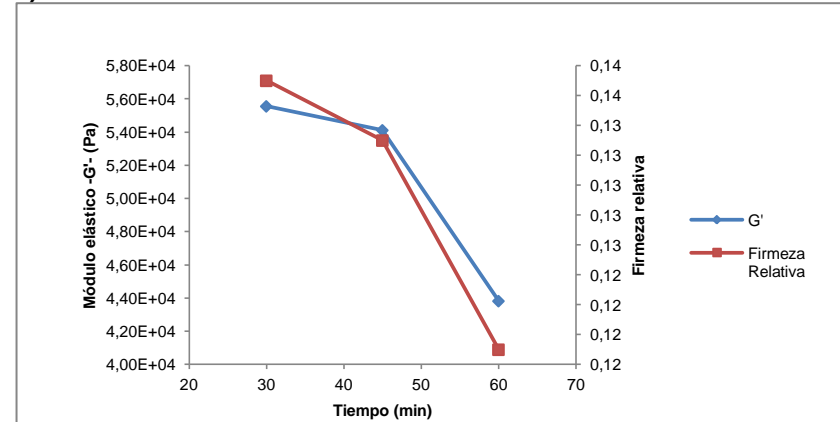


Figura 53. Comportamientos de módulo elástico (G') y firmeza relativa con respecto al tiempo para a) Masa de Guayabo con 70% de humedad procedente de harina procesada por cocción en agua a 76°C, b) Masa de Guayabo con 70% de humedad procedente de harina procesada por cocción en agua a 86°C, c) Masa de Guayabo con 70% de humedad procedente de harina procesada por cocción en agua en ebullición, d) Masa de Hartón con 70% de humedad procedente de harina procesada por cocción en agua en ebullición

Con base en las figuras 50 y 51, puede apreciarse que en la medida que el índice de absorción de agua y el poder de hinchamiento se incrementan, el módulo elástico disminuye, se ha indicado que los gránulos de almidón que presentan mayor poder de hinchamiento producen geles que son más deformables que los geles obtenidos de gránulos con menor poder de hinchamiento. Esta capacidad de deformación afecta la firmeza de los geles, encontrándose que los geles menos hinchados desarrollan geles más firmes. Estos comportamientos pueden relacionarse con el contenido de amilopectina, ya que a mayor contenido de amilopectina se incrementa el poder de hinchamiento de los almidones y se producen geles más elásticos (Hernández *et al.*, 2008). Así mismo, hay que tener presente que los cambios en estos parámetros se van dando con el transcurso del tiempo de cocción, donde el grado de gelatinización del almidón se va haciendo mayor, cuanto más prolongado es el tratamiento y mayor es la temperatura de cocción empleada.

En cuanto al comportamiento observado en las figuras 52 y 53, en la medida que la firmeza relativa disminuye también lo hace el módulo elástico, situación que para las masas de los dos cultivares se presentó cuando las harinas utilizadas en su preparación procedían de trozos cocidos en agua en ebullición y en vapor, esto estaría asociado a que en estos tratamientos el ablandamiento es mayor, el cual a su vez está relacionado al almidón que se ha gelatinizado en un porcentaje muy alto en tiempos relativamente cortos, permitiendo con este fenómeno tener masas que retengan mejor el agua incidiendo favorablemente en la suavidad.

Finalmente, en la metodología se planteó la realización de una regresión lineal para los módulos elástico y viscoso en función de la frecuencia, en el anexo 8 se reúne la información de las pendientes (b) e interceptos (A) correspondientes a las regresiones lineales a las que se sometieron los datos obtenidos de los módulos elástico (G') y viscoso (G'') para las dos condiciones de humedad estudiadas. Para el contenido de humedad del 60% los valores de las pendientes en ambas variedades de los módulos elástico y viscoso dieron muy similares, resultando ligeramente superiores las del módulo viscoso y con mayor similitud en el tratamiento con vapor. Con respecto a las pendientes de las masas preparadas con el 70% de humedad, las correspondientes al módulo viscoso resultaron mayores a las del elástico, caso contrario a lo presentado en un estudio de evaluación de propiedades viscoelásticas de puré de patata dulce en donde los valores de la pendiente fueron mayores para el módulo elástico, lo que implicaría que éste fuese relativamente independiente de la frecuencia, mientras que el módulo viscoso fue dependiente de la frecuencia (Ahmed y Ramaswamy, 2006), de tal manera que para las masas de plátano con un 70% de humedad la dependencia de la frecuencia correspondería al módulo elástico y no al viscoso como en este estudio, lo que podría sugerir estructuras posiblemente más firmes. La tendencia presentada se relacionó con el aumento del módulo elástico a medida que aumentaba la frecuencia.

CONCLUSIONES

Los tratamientos de cocción en agua a 96°C (en ebullición) y en vapor de las muestras de Hartón y Guayabo generaron mayor grado de gelatinización en un tiempo de proceso comprendido entre los 9 y 12 minutos, lo que incidió en que las muestras bajo estas condiciones fueran más blandas siendo más evidente en el cultivar Guayabo que en el Hartón.

Al utilizar el tratamiento de cocción en agua a 76°C el ablandamiento producido en el cultivar Guayabo no está directamente determinado por el fenómeno de gelatinización del almidón, bajo esta condición la pérdida de firmeza estaría dada por la disminución en la capacidad de adhesión celular de los materiales que constituyen la lamela media, tales como sustancias pécticas, hemicelulosa y lignina.

Al efectuar el análisis de viscosidad por RVA, pudo evidenciarse valores más bajos de viscosidad máxima en muestras tratadas bajo condiciones de cocción en agua a 96°C (en ebullición) y en vapor, así como para tiempos prolongados de cocción, ya que fue más evidente la desintegración de los gránulos del almidón como se observó en las imágenes de microscopía electrónica de barrido.

De acuerdo con los resultados de análisis de muestras por RVA se infiere que aquellas que presentaron valores menores de inestabilidad del gel representarían utilidad en la preparación de masas en las que se requiere geles más estables, pues a mayor inestabilidad del gel, mayor facilidad de rompimiento por causas mecánicas.

La utilización de harinas con alta capacidad de absorción de agua y poder de hinchamientos es importante para que se desarrollen estructuras viscoelásticas, característica necesaria para buscar una rápida hidratación de éstas en la formación de masas. Dichas características están relacionadas con mayores temperaturas y tiempos de cocción.

Los métodos y tiempos de cocción de plátano inciden en las características viscoelásticas de las masas, ya que resultó más favorable para su elaboración cocciones donde se empleara agua a 96°C (ebullición) y vapor, con tiempos prolongados de proceso como 45 y 60 minutos.

Los valores de la $\tan \delta$ se mantuvieron en valores cercanos a 0, presentándose materiales elásticos independientemente de las condiciones de cocción, contenidos de humedad a las que se prepararon y tiempos empleados en la obtención de las harinas con las que éstas se elaboraron.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD KARIM, A.; NORZIAH, M. H. y SEOW C. C. (2000). Review: Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*, 71, 9 – 36.
- AHMED, Jasim y RAMASWAMY, Hosahalli S. (2006). Viscoelastic properties of sweet potato puree infant food. *Journal of Food Engineering* 74. 376–382.
- AHMED, Jasim y RAMASWANY, Hosahalli S. (2007). Dynamic rheology and thermal transitions in meat-based strained baby foods. *Journal of Food Engineering*. 78. 1274–1284.
- ANGIOLONI, Alessandro y COLLAR, Concha (2009). Gel, dough and fibre enriched fresh breads: Relationships between quality features and staling kinetics. *Journal of Food Engineering*. 91, 526 – 532.
- ÁLVAREZ, C.; LOPEZ, X.; FERNÁNDEZ, A.; DÍAZ A.; GIBERT, O. y DUFOUR, D. (2008). Variabilidad del plátano en el proceso de cocción: Estudio de textura. ACORBAT, XVIII Reunión Internacional. Guayaquil, Ecuador, 10 a 14 Noviembre.
- ÁLVAREZ C., FERNANDEZ A., DUFOUR D., GIBERT O., GIRALDO A., DIAZ A., UCLES SANTOS R. (2009). Modificación de la textura y del almidón en frutos verdes de musáceas por procesamiento térmico. *Alimentos Hoy : Revista de la Asociacion colombiana de ciencia y tecnologia de alimentos* (18):4 p.. Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos. 6, Ambato, Ecuador.
- ÁLVAREZ, María Dolores y CANET, Wenceslao. (2002). A comparison of various rheological properties for modelling the kinetics of thermal softening of potato tissue (c.v. *Monalisa*) by water cooking and pressure steaming. *International Journal of Science and Technology*, 37, 41 – 55.
- ARISTIZÁBAL, Johanna; SÁNCHEZ Teresa y MEJÍA L, Danilo. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Boletín de servicios agrícolas de la FAO* 163. Roma. ISBN 978-92-5-305677-4
- BAKS; Tim; NGENE Ikenna S; VAN SOEST, Jeroen J.G.; JANSSEN, Anja E.M. y BOOM Remko M. (2007). Comparison of methods to determine the degree of gelatinization for both high and low starch concentrations. *Carbohydrate Polymers* 67. 481 – 490.
- BADUI D, Salvador. (1999). *Química de los alimentos*. 3ra edición. Pearson Educación. México. ISBN 968-444-152-5.
- BANANAS AND FOOD SECURITY. Les productions bananières: un enjeu économique majeur pour la sécurité alimentaire. (1998). *International Symposium*, Douala, Cameroon. Picq, E. Fouré and E.A. Frison, editors, 10-14.
- BELEIA, Adelaide; BUTARELO, Soraya S. y F. SILVA, Rui Sergio. (2006). Modeling of starch gelatinization during cooking of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *LWT*, 39, 399–404.
- BELLO P, Luis A.; AGAMA A, Edith; SÁNCHEZ H, Laura y PAREDES L, Octavio. (1999). Isolation and Partial Characterization of Banana Starches. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 47, 854-857.

BELLO PÉREZ, Luis A.; OSORIO DÍAZ, Perla.; AGAMA ACEVEDO, Edith.; NÚÑEZ SANTIAGO, Carmen y PAREDES LÓPEZ, Octavio. (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia* Volumen 36, Número 3.

BINNER, S, JARDINE WG, RENARD CMCG y JARVIS MC. (2000). Cell wall modifications during cooking of potatoes and sweet potatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 216 – 218.

BOU RACHED, Lizet; de VIZCARRONDO, Consuelo A; RINCÓN, Alicia M. y PADILLA Fanny. (2006). Evaluación de harinas y almidones de mapuey (*Dioscorea trifida*), variedades blanco y morado. *Archivos latinoamericanos de nutrición. Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición*. Vol. 56 N° 4, 375 – 383.

BOURNE, Malcolm. (2002). *Food Texture and Viscosity*. 2da Ed. Academic Press. Londres. ISBN 0-12-119062-5.

BROUSSE, María M.; NIETO, Andrea B.; LINARES, Andrés R. y VERGARA, María L. Cinética de adsorción de agua en purés deshidratados de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). (2012). *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 3 (1): 080-096. ISSN: 2218-4384 (versión en línea)

BULEÓN, A.; COLONNA, P.; PLANCHOT, V. y BALL S. Mini review. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23, 85–112.

CADENA AGROINDUSTRIAL. Plátano. Nicaragua. (2004). IICA, MAGFor y JICA.

CARLOS AMAYA, Fandila. (2010). Propiedades fisicoquímicas y de digestibilidad de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L) sometido a una modificación dual. Tesis para optar al título de Maestría en ciencias en desarrollo de productos bióticos. Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, Morelos, México.

CASARRUBIAS CASTILLO, M. Guadalupe; MÉNDEZ MONTEALVO, Guadalupe; RODRÍGUEZ AMBRIZ, S. Leticia; SÁNCHEZ RIVERA, M. María y BELLO PÉREZ, L. Arturo. (2012). Diferencias estructurales y reológicas entre almidones de frutas y cereales. *Agrociencia* 46, 455-466.

CASARRUBIAS C, María G; SÁNCHEZ R, Mirna M; MÉNDEZ M, Guadalupe y BELLO P, Luis A. (2007). Estudio reológico en almidones aislados de diferentes fuentes. VI Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos, CIBIA VI. Vol. 16 (1).

CASTILLO VIANCHA, K.; PÉREZ DURÁN, I. y DÍAZ ORTIZ, A. (2008). Efecto de la variedad de plátano sobre la calidad de sus tajadas fritas. Trabajo de grado. Universidad del Valle - Universidad Nacional de Colombia.

CAYÓN S, Daniel G., GIRALDO G, Germán A y ARCILA P, María Isabel. (2000). Postcosecha y agroindustria del plátano en el eje cafetero de Colombia. CORPOICA. Armenia. ISBN 958 – 96885 - 0-0.

CEBALLOS, Hernán; SÁNCHEZ, Teresa; DENYER, Kay; TOFIÑO, Adriana P.; ROSERO, Elvia A.; DUFOUR, Dominique; SMITH, Alison; MORANTE, Nelson; PÉREZ, Juan C. and FAHY, Brendan . Induction and Identification of a Small-Granule, High-Amylose Mutant in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). (2008). *J. Agric. Food Chem.* 56, 7215–7222.

CIRO V^a, H.; MONROY, L. F. y CORTÉS, M. E. (2008). Estudio preliminar del comportamiento reológico bajo compresión unidireccional de la pulpa de plátano (*Musa AAB Simmonds*). Dyna, Año 75, No. 155, pp. 155-161. Medellín. ISSN 0012-7353.

CIRO V^b, H.; MONTOYA L, M. L. y MILLÁN C, L. (2005). Caracterización de propiedades mecánicas del banano (Cavendish Valery). Revista Facultad Nacional de Agronomía. Medellín. Vol.58, No.2. p. 2975-2988.

CHUN-HSIEN, Lin y CHI-YUE, Chang. (2005). Textural change and antioxidant properties of broccoli under different cooking treatments. Food Chemistry 90 9–15.

CORPORACIÓN COLOMBIA INTERNACIONAL, CCI. (2000). ACUERDO DE COMPETITIVIDAD DE LA CADENA PRODUCTIVA DEL PLÁTANO EN COLOMBIA. Secretaría Técnica. Bogotá. COLECCIÓN DOCUMENTOS IICA SERIE COMPETITIVIDAD No.18. ISBN: 958-9328-29-6.

CUGGINO, Mariana Isabel. Desarrollo de alimentos precocidos por extrusión a base de maíz-leguminosa. (2006). Universidad. Facultad de Ingeniería Química. UNL. Tesis para la obtención del título de Ingeniera Química. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina.

de la TORRE GUTIÉRREZ, Lázaro; CHEL GUERRERO, Luis A. y BETANCUR-ANCONA, David. (2008). Functional properties of square banana (*Musa balbisiana*) starch. Food Chemistry 106, 1138–1144.

DUFOUR^a D.; GIRALDO, A.; LÓPEZ, X.; CASTELLANOS, F. J.; SÁNCHEZ, T., FERNÁNDEZ, A. y DÍAZ, A. (2007). Diversidad del plátano de cocción consumido en Colombia. Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos, CIBIA VI. Vol. 16 (1). 168 – 172.

DUFOUR^b, D.; GIRALDO, A.; GIBERT, O.; SÁNCHEZ, T.; REYNES, M.; GONZÁLEZ, A.; FERNÁNDEZ, A. y DIAZ, A. (2008). Propiedades fisicoquímicas y funcionales de los bananos de postres, plátanos de cocción y FHIA híbridos: preferencia varietal de los consumidores en Colombia. ACORBAT, Guayaquil.

DUFOUR^c, D.; GIBERT, O.; GIRALDO, A.; SÁNCHEZ, T.; REYNES, M.; PAIN, J. P.; GONZÁLEZ A.; FERNÁNDEZ, A. y DÍAZ, A. (2009). Differentiation between cooking bananas and dessert Bananas. 2. Thermal and functional characterization of cultivated colombian Musaceae (*Musa* sp.). Journal of Agriculture and Food Chemistry.

EGGLESTON, G.; SWENNEN, R. y AKONI, S. (1992). Physicochemical studies on starches isolated from plantain cultivars, plantain hybrids and cooking bananas. Starch/Staerke, 44, 121–128.

ESCALANTE ABURTO, A.; PONCE GARCÍA, N.; SILVAS GARCÍA, M. I.; MAGAÑA BARAJAS, E.; PLATT LUCERO, L.C.; CAMPA RAMOS, R.; TORRES CHÁVEZ, P. I.; RAMÍREZ WONG, B. (2011). Evaluación de la viscoelasticidad de masas de maíz obtenidas por diferentes procesos. Memorias del Simposium Internacional sobre Tecnologías Convencionales y Alternativas en el Procesamiento de Maíz Chihuahua, Chihuahua. México. ISBN: 978-607-7691-88-4.

ESPINAL G, Carlos Federico; MARTÍNEZ COVALEDA, Héctor J y PEÑA MARÍN, Yadira. La cadena de plátano en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica, 1991 – 2005. Ministerio de Agricultura.

FENNEMA, Owen R. (2000). Química de los alimentos. 2da edición. Acribia. Zaragoza. ISBM: 84-200-0914-8.

GAVICHO UARROTA, Virgilio; AMANTE, Edna Regina; MOTTIN DEMIATE, Ivo; VIEIRA, Flavia; DELGADILLO, Ivonne; MARASCHIN, Marcelo. (2013). Physicochemical, thermal, and pasting properties of flours and starches of eight Brazilian maize landraces (*Zea mays* L.) Food Hydrocolloids 30, 614 – 624.

GIBERT^a, Olivier; DUFOUR, Dominique, GIRALDO, Andrés; SÁNCHEZ, Teresa, REYNES, Max; PAIN, Jean-Pierre, GONZÁLEZ, Alonso; FERNÁNDEZ, Alejandro and DÍAZ, Alberto. (2009). Differentiation between Cooking Bananas and Dessert Bananas. 1. Morphological and Compositional Characterization of Cultivated Colombian Musaceae (*Musa* sp.) in Relation to Consumer Preferences. *J. Agric. Food Chem.*, 57 (17), 7857–7869.

GIBERT^b, Olivier; GIRALDO, Andrés; UCLÉS SANTOS, José Ricardo; SÁNCHEZ, Teresa; FERNÁNDEZ, Alejandro; BOHUON, Philippe; REYNES, Max; GONZÁLEZ, Alonso; PAIN, Jean Pierre and DUFOUR, Dominique. (2010). A kinetic approach to textural changes of different banana genotypes (*Musa* sp.) cooked in boiling water in relation to starch gelatinization. Journal of food engineering, 98 (4), 471-479.

GOÑI, Isabel; GARCÍA-ALONSO Alejandra y SAURA-CALIXTO, Fulgencio (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. Nutrition Research, Vol. 17. No. 3, pp. 427-437.

GONZÁLEZ B, Oswaldo J. y PACHECO-DELAHAYE, Emperatriz. (2006). Propiedades físicas y reológicas de la harina de banana verde (*Musa* AAA) en la elaboración de geles de piña (*Ananas comosus* L. Merr.). Rev. Fac. Agron. (Maracay) 32:27 -40.

GUYLÈNE, Aurore; PARFAIT, Berthe y FAHRASMANE Louis. (2008). Bananas, raw materials for making processed food products. Trends in Food Science & Technology 1 – 13.

HAPPI EMAGA, T.; HERINAVALONA A, R.; WATHELET, B.; TCHANGO TCHANGO, J y PAQUOT, M. (2007). Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. Food Chemistry 103, 590–600.

HERMANSSON Anne-Marie y SVEGMARK Karin. (1996). Developments in the understanding of starch functionality. Trends in Food Science & Technology, Vol. 71.

HERNÁNDEZ MEDINA, Marilyn; TORRUCO UCO, Juan Gabriel; CHEL GUERRERO, Luis; BETANCUR ANCONA, David. (2008). Caracterización físicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 28(3): 718-726. ISSN 0101-2061.

HERNÁNDEZ PEÑAS, Mireia. Estudio del efecto de la temperatura de cocción en la calidad nutricional y la textura en un producto de V gamma esterilizado a partir de judía verde (*Phaseolus vulgaris* var. *perona*). Proyecto de Investigación. Escuela Superior de Agricultura, Barcelona. 2007.

HOYOS LEYVA, Javier Darío; JARAMILLO JIMÉNEZ, Paula Andrea; GIRALDO TORO, Andrés, DUFOUR, Dominique, SÁNCHEZ, Teresa y LUCAS AGUIRRE, Juan Carlos. (2012). Caracterización física, morfológica y evaluación de las curvas de empastamiento de musáceas (*Musa* spp.). Acta Agronómica. 61 (3) p 214-229.

HUANG, Y. T y BOURNE, M. C. (1983). Kinetics of thermal softening of vegetables. Journal of texture studies. 14, 1 – 9.

INSTITUTO COLOMBIANO DE BIENESTAR FAMILIAR. Tabla de composición de alimentos colombianos. Disponible en:

http://alimentoscolombianos.icbf.gov.co/alimentos_colombianos/consulta_alimento.asp (2 Ago, 2013).

INSTITUTO NACIONAL DE NUTRICIÓN. Tabla de composición de alimentos colombianos. Bogotá. 2005.

JASPREET, Singh; NARPINDER, Singh; T.R, Sharma y S.K., Saxena. (2003) Physicochemical, rheological and cookie making properties of corn and potato flours. Food Chemistry 83 387–393.

JIMÉNEZ MÁRQUEZ, Erika. Elaboración de harina de tres variedades de plátano verde (*Musa spp*) y su uso como materia prima para la panificación. (2012). Tesis para la obtención del título de Maestra en Ciencias. Colegio de postgraduados, Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Tabasco, México.

JOHNSON, P. N. T y BRENNAN J. G. (2000). Kinetics of moisture absorption by plantain flour. Journal of Food Engineering. 45, 33 - 36.

KAABER, Lene; KAACK, Karl; KRIZNIK, Torine; BRÅTHEN, Erland, HALVOR KNUTSEN, Svein. Structure of pectin in relation to abnormal hardness after cooking in pre-peeled, cool-stored potatoes. LWT 40 (2007) 921–929

KITTIPONGPATANA, Ornanong S. y KITTIPONGPATANA, Nisit. Preparation and physicochemical properties of modified jackfruit starches. (2011). LWT - Food Science and Technology 44, 1766 – 1773.

LÓPEZ, Olivia V.; ZARITZKY, Noemí E. y GARCÍA, M. Alejandra. (2009). Efecto de la acetilación sobre el comportamiento reológico y la retrogradación del almidón de maíz. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencia y Tecnología de Alimentos – VII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos. Memorias trabajos presentados. Bogotá. ISSN: 2027-2030.

LÓPEZ VÁZQUEZ, R; ABRIL REQUENA, J. y CASP, A. Cinética de cocción de judías verdes. Póster. III Congreso Español de Ingeniería de Alimento. Actas del III Congreso Español de Ingeniería de Alimentos (CD-Rom), ISBN: 84-688-7989-4, 716-722. 2004.

Pamplona

(España).

Web:

http://www.acyja.com/documentos/Comunicaciones_Congresos/Comunicaciones/Cesia_2004/TCE-06.PDF. Fecha de consulta: Mayo 17 de 2012.

MASTROMATTEO, Marcella; GUIDA, Mariangela; DANZA, Alessandra; LAVERSE, Janine; RISULLO, Pierangelo; LAMPIGNANO, Vincenzo; DEL NOBILE, Matteo Alessandro. (2013). Rheological, microstructural and sensorial properties of durum wheat bread as affected by dough water content. Food Research International 51, 458–466.

MILLÁN, P; TORRES, J; VALENCIA, L.M; FERNÁNDEZ, A y DUFOUR, D. Caracterización del proceso de cocción en agua de yuca (*Manihot esculenta*, Crantz) empacada en vacío. Memorias CIBIA 2011. Lima.

MONDRAGÓN CHAPARRO, Margarita. (2004). Estudio comparativo de cambios estructurales y funcionales en almidones de maíz nixtamalizados. Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional. México.

MORALES, H. (1994). Caracterización bromatológica y uso potencial de harinas de plátano en siete épocas de cosecha. Trabajo de grado en Tecnología Agroindustrial. Universidad del Quindío, Colombia.

MORILLO CORONADO, Yacenia. Herencia del contenido de carotenos en raíces de yuca. Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar el título de Doctor en Ciencias Agrarias con énfasis en Mejoramiento Genético, Agronomía y Producción de Semillas de Cultivos Tropicales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, 2009.

NARVÁEZ GONZÁLEZ, Ernesto David; FIGUEROA CÁRDENAS, Juan de Dios; TABA, Suketoshi; CASTAÑO TOSTADO, Eduardo y MARTÍNEZ PENICHE, Ramón Álar. (2007). Efecto del tamaño del gránulo de almidón de maíz en sus propiedades térmicas y de pastificado. Rev. Fitotec. Mex. Vol. 30 (3): 269 – 277.

NISHA, P.; SINGHAL, REKHA S. y PANDIT, ANIRUDDHA B. (2006). Kinetic modelling of texture development in potato cubes (*Solanum tuberosum* L.), green gram whole (*Vigna radiate* L.) and red gram splits (*Cajanus cajan* L.). Journal of Food Engineering 76 524–530.

NJINTANGY.N. y MBOFUNG C.M.F. (2006). Effect of precooking time and drying temperature on the physico-chemical characteristics and in-vitro carbohydrate digestibility of taro flour. LWT, 39, 684–691.

NWOKOCHA, L. M. y Williams P. A. (2009). Some Properties of White and Yellow Plantain (*Musa paradisiaca*, *Normalis*) Starches, Carbohydrate Polymers, 76, 133–138.

OLAOYE, O. A.; ONILUDE, A. A, e IDOWU, O. A. (2006).Quality characteristics of bread produced from composite flours of wheat, plantain and soybeans. African Journal of Biotechnology. Vol. 5 (11), pp. 1102-1106.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. FAOSTAT. <http://193.43.36.221/site/DesktopDefault.aspx?PageID=339&lang=es>.

PACHECO-DELAHAYE, Emperatriz; MALDONADO, Ronald; PÉREZ, Elevina y SCHROEDER, Mily. Production and characterization of unripe plantain (*Musa paradisiaca* L.) Flours. (2008). Interciencia. INCI. Vol. 33. No. 4. ISSN 0378-1844.

PACHECO-DELAHAYE Emperatriz y TESTA Giusepina. (2005). Evaluación nutricional, física y sensorial de panes de trigo y plátano verde. INCI. Vol.30. No.5.Caracas. ISSN 0378-1844.

PALMA FAVARO, Simone; BELEÍA, Adelaide; DA SILVA FONSECA, Nelson Junior y WILLIAM WALDRON Keith. (2008). The roles of cell wall polymers and intracellular components in the thermal softening of cassava roots. Food Chemistry, 108, 220–227.

PARKER, R and RING, S. G. (2001). Aspects of the Physical Chemistry of Starch. Journal of Cereal Science, 34, 1–17.

PINEDA GÓMEZ, P.; CORAL, D. F.; ARCINIEGAS, M.; RORALES RIVERA, L. A.; RODRÍGUEZ GARCÍA, M. E. (2010). Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. Ingeniería y Ciencia, vol. 6, núm. 11, enero-junio, pp. 129-141.

PORTAFOLIO.CO. Colombia es el segundo importador de plátano del mundo. Octubre de 2011. <<http://www.portafolio.co/negocios/colombia-es-el-segundo-importador-platano-del-mundo>>. (15 Jul. 2013).

QI, Baoxiu, MOORE Keith G and ORCHARD John. (2000). Effect of cooking on banana and plantain texture. Journal Agriculture and Food Chemistry, 48, 4221-422.

RAO, M. A. y LUND, D. B. (1986). Kinetics of thermal softening of foods. A review. *Journal of Food Processing and Preservation* 10, 311 – 329.

RESTREPO M, Diego A. (2002). Alternativas de industrialización del plátano. Una propuesta. Acorbat. Memorias XV reunión. Cartagena.

RIVAS GONZÁLEZ, Mayra; MÉNDEZ MONTEALVO, M. Guadalupe C.; SÁNCHEZ RIVERA, Mirna M.; NÚÑEZ SANTIAGO, M. Carmen y BELLO PÉREZ Luis A. (2008). Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica del almidón de plátano oxidado y lintnerizado. *Agrociencia* 42: 487-497.

RIZVI, A. F. y TONG, C. H. (1997). Fractional conversion for determining texture degradation kinetics of vegetables. *Journal of Food Science*. Vol, 62, No. 1, pp. 1 – 7.

RODRÍGUEZ A, Sandra L; SÁNCHEZ R, Mirna M; MÉNDEZ M, Guadalupe y BELLO P, Luis A. (2007). Caracterización molecular de amilasas obtenidas de diferentes fuentes botánicas. VI Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos, CIBIA VI. Vol. 16 (2), 184 – 185.

RODRÍGUEZ^a SANDOVAL. Eduardo.; FERNÁNDEZ QUINTERO. Alejandro. y AYALA APONTE, Alfredo. (2005). Modelos reológicos aplicados a masas de trigo y maíz. *Revista Ingeniería e Investigación* (58). Vol 25, No. 2.

RODRÍGUEZ^b SANDOVAL, Eduardo; FERNÁNDEZ QUINTERO, Alejandro; ALONSO ALCALÁ, Lisímaco y OSPINA PATIÑO, Bernardo. (2006): Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. *Ingeniería & Desarrollo*. Número 19. ISSN: 0122-3461.

RODRÍGUEZ^c SANDOVAL, Eduardo; CUVELIER, Gérard y FERNÁNDEZ QUINTERO, Alejandro. (2007). Influencia de las condiciones de proceso en las características físicas de masas de yuca. *Ingeniería y Competitividad*. Volumen 9, número 1, p. 7 – 17.

RODRÍGUEZ S^d, E.; FERNÁNDEZ Q, A; SANDOVAL A, A. y QUICAZÁN, M. (2008). Effect of cooking time and storage temperature on the textural properties of cassava dough. *Journal of Texture Studies*, 39, 68–82.

RONDÁN-SANABRIA, Gerby Giovanna y FINARDI-FILHO, Flavio. (2009). Physicalchemical and functional properties of maca root starch (*Lepidium meyenii* Walpers). *Food Chemistry*. 114, 492 – 498.

ROUDOT, Alain-Claude. (2004). Reología y análisis de la textura de los alimentos. Acribia, S.A. Zaragoza. ISBN: 84-200-1038-3.

RUALES, Jenny; CARPIO, Cecilia; SANTACRUZ, Stalin; SANTACRUZ, Priscila y BRAVO, Juan. (2000). Manual de métodos de caracterización de carbohidratos. Proyecto de investigación precompetitiva XI.8 “Obtención y caracterización de carbohidratos para su aplicación en regimens especiales”. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED). Quito.

SAHIN Serpil y SUMNU Servet. (2007). Rheological Properties of Foods. Chapter 2. Springer, New York. ISBN (On line) 978-0-387-30808-1.

SALINAS MORENO, Y; HERRERA CORREDOR, J.A; CASTILLO MERINO, J. y PÉREZ HERRERA, P. (2003). Cambios fisicoquímicos del almidón durante la nixtamalización del maíz en variedades con diferente dureza de grano. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. V. 53 N.2.

SALVADOR, A.; SANZ, T. y FISZMAN S.M. (2006). Dynamic rheological characteristics of wheat flour–water doughs. Effect of adding NaCl, sucrose and yeast. *Food Hydrocolloids* 20, 780–786.

SANGEETHA MISHRA, T. Rai. Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches. (2006). *Food Hydrocolloids* 20, 557–566.

SEETHARAMAN, K., CHINNAPHA, N. WANISKA, R. D. and WHITE P. (2002). Changes in textural, pasting and thermal properties of wheat buns and tortillas during storage. *Journal of cereal Science*, 35, 215–223.

SILA, Daniel N; DUVETTER, Thomas; De ROECK, Ans; VERLENT, Isabel; SMOUT, Chantal; MOATES, Graham K; HILLS, Brian P.; WALDRON, Keith K.; HENDRICKX, Marc and VAN LOEY, Ann. Texture changes of processed fruits and vegetables: potential use of high-pressure processing. *Trends in Food Science & Technology* 19 (2008) 309 - 319.

SINGH Narpinder; KAUR, Lovedeep; EZEKIEL, Rajaranganathan y SINGH GURAYA, Harmeet (2005). Microstructural, cooking and textural characteristics of potato (*Solanum tuberosum* L) tubers in relation to physicochemical and functional properties of their flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1275 – 1284.

SINGH, Narpinder; SINGH, Jaspreet; KAUR, Lovedeep; SINGH SODHI, Navdeep y SINGH GILL Balmeet (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry* 81, 219–231.

SINGH, Jaspreet; KAUR, Lovedeep y MCCARTHY, Owen J. Potato Starch and its Modification. Capítulo 10. (2009). Elsevier.

STEELE, A. F. (1997). Characterisation of Starch in *Musa* Fruits. Tesis de doctorado. Universidad de Bath.

STEFFE, James F. Rheological methods in food process engineering. (1992). 2 ed. Freeman Press. ISBN 0-9632036-1-4.

TESTER, Richard F; KARKALAS, John y QI, Xin. (2004). Starch composition, fine structure and architecture. Review. *Journal of Cereal Science*, 39, 151–165.

THOMAS David J y ATWELL, William A. Starches. (1999). Eagan Press. ISBN 0-891127-01-2.

TORRES MORA, Ana María y ÁLVAREZ SAA, Eduardo. (2008). Evaluación del proceso combinado de deshidratación por inmersión y fritura para tres variedades de plátano. Trabajo de grado. Universidad del Valle - Universidad Nacional de Colombia.

TORTOE, Charles; JOHNSON, Paa-Nii T. y NYARKO Apollonius I. (2009). Effects of osmodehydration, blanching and semi-ripening on the viscoelastic, water activity and colorimetry properties of flour from three cultivars of plantain (*Musa* AAB). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 10, 82 – 86.

TURHAN, Mahir y SAĞOL Sevim. (2004). Abrupt changes in the rates of processes occurring during hydrothermal treatment of whole starchy foods around the gelatinization temperature. A review of the literature. *Journal of Food Engineering*, 62, 365–371.

TURHAN Mahir y Gunasekaran Sundaram. (2002). Kinetics of in situ and in vitro gelatinization of hard and soft wheat starches during cooking in water. *Journal of Food Engineering* 52 1–7

TRIBESS, T.B.; HERNÁNDEZ URIBE, J.P.; MÉNDEZ MONTEALVO, M.G.C.; MENEZES, E.W.; BELLO PÉREZ, L.A. y TADINI C.C. (2009). Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions. *LWT - Food Science and Technology* 42, 1022–1025.

VACLAVIK, Vickie A. y CHRISTIAN, Elizabeth W. (2008). Chapter 7. Vegetables and Fruits. Essentials of Food Science. Part II. Springer New Cork. ISBN (Online): 978-0-387-69940-0.

VALENCIA LONDOÑO, Luisa María y TORRES JAIMES, Jairo Eliécer. Caracterización del proceso de cocción de yuca a presión atmosférica con empaque y sin empaque al vacío. Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros de Alimentos. Universidad del Valle, Cali, 2011.

VÁZQUEZ C, Rubén, ROMERO C, Alberto, FIGUEROA V, Jesús y MUNRO O, David. Serie 001 (2005). Paquete tecnológico para el cultivo del plátano.

VERGARA MÉNDEZ; Brenda Zorayda. Efecto de la modificación química dual del almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L) sobre las propiedades térmicas, morfológicas y estructurales. (2012). Trabajo de grado para optar al título de Licenciada en Ciencias Químicas. Universidad del Papaloapan, México.

VIDAL, V.; PONS B.; BRUNNSCHWEILER, J.; HANDSCHIN, S.; ROUAU, X. y MESTRES, C. (2007). Cooking behavior of rice in relation to Kernel physicochemical and structural properties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 55, 336-346.

ZAMUDIO FLORES, P. Baruk; VARGAS TORRES, Apolonio; GUTIÉRREZ MERAZ, Felipe; BELLO PÉREZ, Luis A. Caracterización fisicoquímica de almidones doblemente modificados de plátano. *Agrociencia* v.44 n.3 México abr./mayo 2010. ISSN 1405-3195.

ZHANG, P; WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N. y HAMAKER, B. R. (2005). Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility. A review. *Carbohydrate Polymers*, 59, 443–458.

ZHIQIANG LIU, Eric y SCANLON, Martin G. Modeling the effect of blanching conditions on the texture of potato strips. *Journal of Food Engineering* 81 (2007) 292–297